Vivere su una nuova Terra

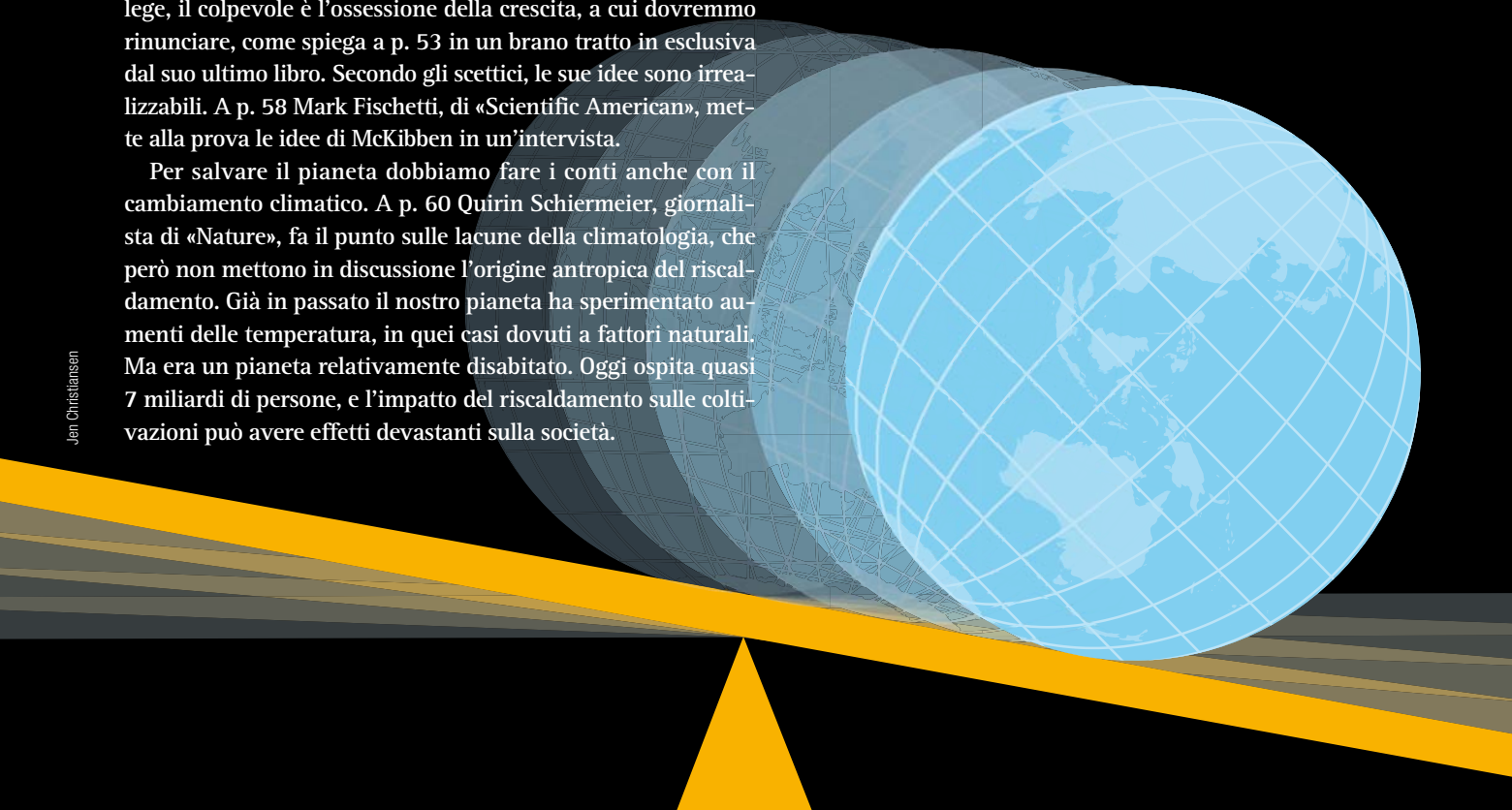
L'umanità ha profondamente alterato il pianeta, ma se cominciamo a pensare e ad agire in maniera diversa possiamo ancora evitare l'autodistruzione

Dimenticatevi le banche e l'industria dell'automobile. Il nostro pianeta è l'unico sistema «troppo grande per collassare». Per secoli ne abbiamo sfruttato le risorse e ci siamo spostati ogni volta che una sorgente si prosciugava o un terreno diventava troppo inquinato. Oggi però questa strategia non funziona più. Abbiamo trasformato la Terra in un'enorme fabbrica, ed è necessario ritornare a una condizione più sostenibile se vogliamo sopravvivere in un mondo sempre più affollato e minacciato dal riscaldamento del clima. Un monito che ricorda quello lanciato alla fine del Settecento dall'economista inglese Thomas R. Malthus, il quale predisse che i miglioramenti della qualità della vita sarebbero stati compromessi dalla crescita della popolazione.

Quale potrebbe essere, quindi, il piano di emergenza per salvare il pianeta? Il primo passo è determinare quanto siamo vicini al collasso. A p. 46 lo scienziato ambientale Jonathan Foley presenta i risultati di uno studio che ha calcolato i limiti di sicurezza di diversi processi ambientali fondamentali da tenere sotto controllo. E a p. 50 otto esperti propongono specifici rimedi per non oltrepassare i limiti. Queste proposte potrebbero rallentare il degrado, ma potrebbero non bastare.

Secondo l'ambientalista Bill McKibben, del Middlebury College, il colpevole è l'ossessione della crescita, a cui dovremmo rinunciare, come spiega a p. 53 in un brano tratto in esclusiva dal suo ultimo libro. Secondo gli scettici, le sue idee sono irrealizzabili. A p. 58 Mark Fischetti, di «Scientific American», mette alla prova le idee di McKibben in un'intervista.

Per salvare il pianeta dobbiamo fare i conti anche con il cambiamento climatico. A p. 60 Quirin Schiermeier, giornalista di «Nature», fa il punto sulle lacune della climatologia, che però non mettono in discussione l'origine antropica del riscaldamento. Già in passato il nostro pianeta ha sperimentato aumenti delle temperatura, in quei casi dovuti a fattori naturali. Ma era un pianeta relativamente disabitato. Oggi ospita quasi 7 miliardi di persone, e l'impatto del riscaldamento sulle coltivazioni può avere effetti devastanti sulla società.



Jen Christiansen

Vedere «impossibili»

In condizioni opportune, possiamo vedere i colori proibiti dalla teoria della percezione cromatica. Queste allucinazioni, insieme ad altre di natura geometrica, aiutano a capire meglio il funzionamento del sistema visivo

di Vincent A. Billock e Brian H. Tsou

Spesso gli ingegneri caricano una struttura con un peso oppure la scuotono finché non crolla o cade a pezzi. E, come gli ingegneri, molti scienziati nutrono un amore segreto per i test distruttivi: tanto più catastrofico è il disastro, tanto meglio. Gli studiosi della visione evitano danni (e cause civili) irreversibili, ma trovano affascinanti e istruttivi i danni reversibili, a volte critici, come i disorientamenti spaziali e i *blackout* visivi che colpiscono i piloti militari. Al Laboratorio di ricerca della U.S. Air Force, esploriamo i difetti visivi più catastrofici, ma reversibili. Creiamo le condizioni in cui i soggetti vedono immagini che fluiscono come cera bollente e si frammentano come un mosaico infranto. In questo articolo racconteremo le due disfunzioni del sistema visivo più interessanti che abbiamo studiato: i colori proibiti e le allucinazioni geometriche influenzate.

Avete mai visto un giallo bluastro? Attenzione, non intendiamo il verde! Alcuni verdi possono apparire bluastri, altri tendenti a una tonalità gialla. Ma nessun verde, o altro colore, appare bluastro e giallastro allo stesso tempo. E avete mai visto un verde che tende al rosso? Non intendiamo il marrone color fango che si potrebbe ottenere mescolando tinte, oppure il giallo ottenuto combinando rosso e verde chiaro, o ancora la trama di un dipinto puntinista composta da punti rossi e verdi. Intendiamo un singolo colore che appare rossastro e verdastro allo stesso tempo, e nello stesso posto.

Creando le giuste condizioni, abbiamo visto questi colori inimmaginabili, o proibiti. E li hanno visti i soggetti dei nostri esperimenti. Abbiamo scoperto il modo per controllare, o influenzare, le figure allucinatorie dei cerchi concentrici o dei raggi di una ruota percepiti dai soggetti in una luce che sfarfalla rapidamente, anche se il risultato della nostra influenza si è rivelato opposto alle nostre aspettative. Entrambi i fenomeni rivelano qualcosa di nuovo sui fondamenti neurali dell'opponenza, uno dei primi concetti della percezione.

L'opponenza è un fenomeno diffuso in fisiologia. Per esempio quando pieghiamo un braccio rilassiamo il tricipite e allo stesso tempo contraiamo il bicipite: tricipite e bicipite sono muscoli opponenti, vale a dire operano in opposizione diretta fra loro. Nel 1872 il fisiologo tedesco Ewald Hering ipotizzò che la visione dei colori fosse basata sull'opponenza tra rosso e verde, e tra giallo e blu; in ciascuna zona del campo visivo, i «muscoli» del rosso e del verde si oppongono reciprocamente. La percezione del rosso in una zona preclude la percezione del verde nella stessa zona e viceversa, proprio come è impossibile piegare e distendere simultaneamente un braccio. Tutte le tonalità cromatiche percepite si possono generare combinando il rosso o il verde con il giallo o con il blu. La teoria di Hering spiegava perché gli esseri umani percepiscono insieme il blu e il verde come turchese, il rosso e il giallo come arancione, e così via; e perché non percepiscono il rosso con il verde o il blu con il giallo nello stesso posto e nello stesso tempo.

Jen Christiansen

Colori assurdi

Il fatto di non vedere miscele di colori opponenti è una delle osservazioni più solide delle scienze cognitive. Le ricerche hanno inoltre indicato che l'opponenza cromatica inizia nella retina e nel mesencefalo – la prima regione cerebrale coinvolta nella visione – dove i nervi trasportano dati che corrispondono al segnale di un colore sottratto a un altro. I segnali dei colori puri hanno origine in particolari cellule della retina, i coni, che rivelano la luce sotto forma di tre lunghezze d'onda sovrapposte. Altri tipi di cellule sommano e sottraggono i segnali in uscita dai tre differenti tipi di coni, e producono i segnali relativi ai quattro colori primari: rosso, verde, giallo e blu. Ma è come se il sistema visivo fosse cablato con un canale di dati rosso-meno-verde, in cui i segnali positivi rappresentano livelli di rosso, i segnali negativi rappresentano il verde e zero segnali non rappresentano nessuno dei due. E il discorso si ripete per il canale giallo-meno-blu. Questo schema di circuiti avvalora le leggi di Hering dell'opponenza cromatica.

Tuttavia nel 1983 Hewitt D. Crane e Thomas P. Piantanida, dello SRI International di Menlo Park, in California, hanno documentato un modo per aggirare le regole percettive che vietano l'esistenza di colori come il verde rossastro o il blu giallognolo. I due avevano mostrato ad alcuni soggetti due campi affiancati, rosso e verde, o giallo e blu, e appositi strumenti seguivano gli occhi dei soggetti orientando alcuni specchi per mantenere stabili i campi con i colori. In altre parole, i campi con i colori venivano fissati sulla retina di ciascun soggetto nonostante i piccoli, incessanti movimenti oculari. La stabilizzazione dell'immagine produce molti effetti interessanti, per esempio un'immagine che sembra frantumarsi e la cui visibilità va e viene. Crane e Piantanida hanno trovato particolarmente interessante la tendenza dei bordi a svanire nelle immagini stabilizzate.

In effetti, i soggetti dell'esperimento hanno visto svanire il confine tra i due colori opponenti, e i colori fluire e mescolarsi in un confine ormai inesistente. Altri poi hanno riferito di aver visto il verde rossastro e il blu giallognolo proibiti; altri ancora hanno percepito allucinazioni della tessitura, per esempio un blu scintillante su sfondo giallo.

L'articolo di Crane e Piantanida avrebbe dovuto suscitare molto interesse. Due ricercatori autorevoli riferivano una violazione importante della legge psicofisica più assodata. E invece l'articolo è quasi passato sotto silenzio tra gli esperti della visione.

Per noi sono quattro le ragioni del disinteresse. La prima è che il risultato era privo di coerenza: alcuni soggetti vedevano allucinazioni della tessitura invece dei colori proibiti. La seconda è che i colori proibiti erano difficili da descrivere. Crane e Piantanida hanno provato ad aggirare il problema facendo descrivere i colori ad alcuni pittori: ma non ha funzionato. La terza ragione è che l'esperimento è difficile da replicare: Crane aveva inventato uno strumento speciale per seguire l'occhio, ma era difficile da usare, oltre che costoso. Infine, quarta ragione, i due ricercatori non hanno saputo inquadrare il risultato in una teoria. Siamo convinti che questo è stato l'ostacolo più importante: è difficile riflettere su elementi che non si incastrano nel paradigma esistente. Crane e Piantanida hanno ipo-

IN SINTESI

- Rosso e verde sono definiti colori opponenti perché, di regola, non riusciamo a vedere simultaneamente «rossità» e «verdità» in un unico colore. Lo stesso vale anche per il giallo e il blu.
- Per lungo tempo si è pensato che i responsabili dell'opponenza cromatica fossero circuiti cerebrali, e che quindi non si potesse percepire il verde rossastro o il blu giallastro.
- Tuttavia, in specifiche condizioni possiamo vedere i colori «proibiti», un indizio del fatto che l'opponenza cromatica nel cervello passa per uno stadio che può essere disattivato.
- Nella luce sfarfallante vediamo una varietà di allucinazioni geometriche dotate di proprietà che indicano un'opponenza geometrica, che mette in contrapposizione cerchi concentrici e forme a ventola.

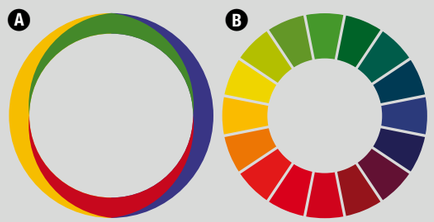
Vedere colori vecchi e nuovi

Il fenomeno cognitivo dell'opponenza cromatica (*in basso*) si può sospendere per consentire la percezione di colori di solito non osservati (*si veda la pagina a fronte*).

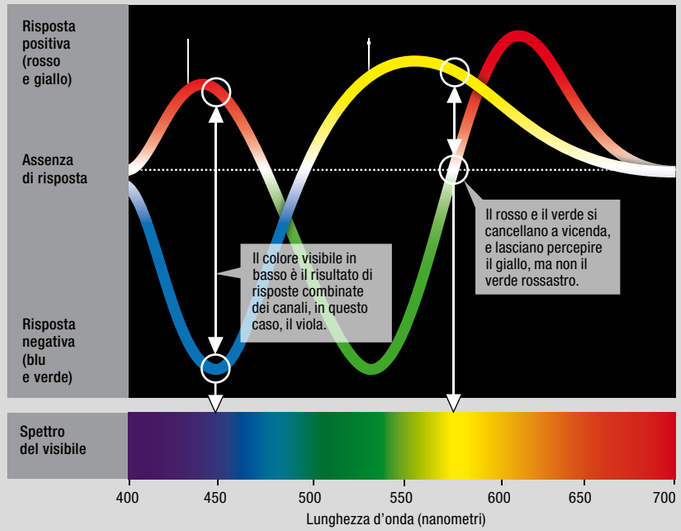
COME FUNZIONA L'OPPONENZA CROMATICA

Nell'uomo la visione dei colori sembra basata su due coppie di colori, definiti colori opponenti: giallo e blu, e rosso e verde. La percezione di uno dei due (per esempio il giallo) impedisce la percezione del colore opponente (il blu) in quel punto e nello stesso istante. Quindi, anche se di regola percepiamo colori che si combinano con altri colori (come il viola che compare mescolando rosso e blu) non possiamo vedere un blu giallognolo né un verde rossastro. Il nostro sistema visivo sembra usare due canali per l'informazione dei colori (*a destra*): un canale giallo-meno-blu, che segnala la «giallità» o la «bluità», ma non entrambe, e un canale rosso-meno-verde.

▼ Mescolare varie quantità di giallo o di blu con il rosso o con il verde (*a*) produce tutte le tonalità che vediamo (*b*). Questa illustrazione si ispira all'illustrazione di Edward Hering, che propose la teoria nel 1897.



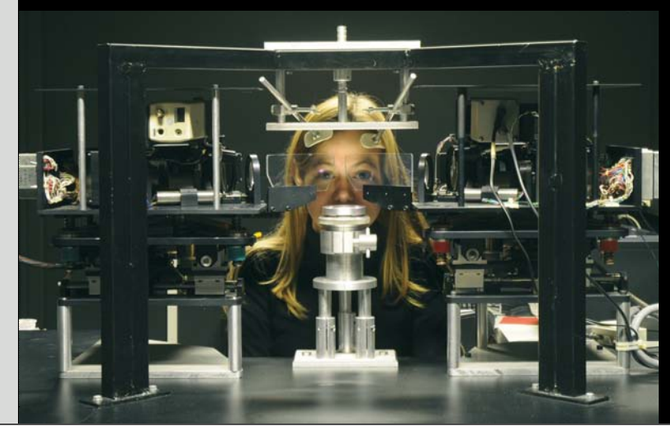
▼ L'aspetto dello spettro è spiegato dal modo in cui i canali a due colori del sistema visivo rispondono alla luce: perché, per esempio, la luce viola appare blu rossastra, e la luce gialla non appare verde rossastra.



COME VEDERE I COLORI PROIBITI

Gli autori hanno scoperto condizioni insolite che permettono di percepire il blu giallognolo e il verde rossastro, cioè due colori proibiti. Questo risultato dimostra che i circuiti cerebrali responsabili dell'opponenza cromatica non sono rigidi come si pensava. A quanto pare il meccanismo dell'opponenza si può disabilitare.

▼ Negli esperimenti sui colori proibiti, un apposito strumento segue e controlla i movimenti oculari dei soggetti in modo che gli stimoli cromatici rimangono in una posizione fissa sulla retina.



▼ Quando i soggetti fissavano campi adiacenti di colori opponenti (in questo caso blu e giallo) e l'immagine era immobile sulla loro retina, il confine tra i campi sembrava svanire, permettendo ai colori di mescolarsi (*a*). Quando un campo era molto più luminoso dell'altro, le miscele formavano tessiture e strutture, per esempio punti blu su uno sfondo giallo. Ma nel caso di una luminanza paragonabile la maggior parte dei soggetti vedeva colori nuovi (blu giallastri), di solito impossibili da percepire o da rappresentare accuratamente (*b*).

Cortesia Peter De Graef; strumentazione fotografata da Johan Van Rensbergen del Laboratorio di psicologia sperimentale dell'Università di Lovanio (*apparato sperimentale*); George Retseck (*esperimento giallo/blu*); Jen Christiansen (*portatile*)

Cortesia General Dynamics, Inc. (*Billock*); cortesia Brian H. Tsou (*Tsou*); Catherine Wilson (*ruote colorate*); Jen Christiansen (*grafico dello spettro*)

tizzato di aver aggirato la parte del sistema visivo responsabile dell'opponenza cromatica e di aver attivato un meccanismo di riempimento percettivo, ma non hanno sviluppato questa teoria.

La nostra idea «luminante»

Anni fa abbiamo avuto un'idea sulla possibile spiegazione delle percezioni variabili nei soggetti studiati da Crane e Piantanida. Sapevamo che, oltre alla stabilizzazione dell'immagine, la permeabilità dei confini è generata da un'altra condizione sperimentale, che si verifica quando la luminanza di due colori adiacenti è equivalente. La luminanza è simile, ma non identica, alla luminosità percepita. Per un osservatore, due colori sono equiluminanti se il passaggio molto rapido da uno all'altro produce un sfarfallio minimo.

Quando i soggetti fissano due campi adiacenti equiluminanti vedono indebolirsi e poi scomparire il confine tra i colori, i quali fluiranno dunque l'uno nell'altro, a eccezione delle coppie rosso-verde e giallo-blu. Sapevamo, inoltre, che l'effetto-scomparsa del confine è più marcato quando l'osservatore riduce al minimo i movimenti oculari. Forse gli effetti di equiluminanza e di stabilizzazione si combinano in modo sinergico, portando alla scomparsa del confine e a un mescolamento dei colori tanto potente da verificarsi anche nei colori opponenti. Per verificare questa teoria, abbiamo collaborato con il tenente colonnello Gerald A. Gleason, esperto di movimenti oculari del Laboratorio di ricerca della U.S. Air Force.

Abbiamo assicurato i soggetti allo strumento di Gleason servendoci di una mentoniera, in modo da ridurre al minimo i movimenti della testa. E abbiamo escluso pittori e non addetti ai lavori. Volevamo infatti studiosi della visione, esperti nella teoria dei colori, scettici sui colori inconcepibili nella filosofia di Hering e capaci di descrivere le osservazioni in un forbito «visionese» sintetico, importante quando si biascicano le proprie osservazioni a denti stretti. Volevamo, inoltre, soggetti credibili, che potessero testimoniare al cospetto di colleghi increduli. Quindi abbiamo reclutato sette studiosi della visione, inclusi Gleason e uno di noi (Billock), dotati di una visione cromatica normale.

Visto che le persone hanno una percezione variabile della luminanza di colori differenti, prima abbiamo misurato le risposte dei soggetti al rosso, al verde, al giallo e al blu. Poi abbiamo mostrato campi di rosso e di verde, o di giallo e di blu, affiancati. I colori erano stati preparati per apparire equiluminanti oppure non equiluminanti.

La combinazione di equiluminanza e di stabilizzazione dell'immagine è stata efficace. Nel caso delle immagini equiluminanti, sei osservatori su sette vedevano i colori proibiti, a differenza della visione del settimo osservatore, che diventava quasi subito grigia. I confini tra i due colori svanivano, e i colori stessi attraversavano il confine mescolandosi. A volte il risultato era una specie di gradiente che passava, per esempio, dal rosso sulla sinistra al verde sulla destra, con ogni possibile sfumatura intermedia di rosso verdognolo o di verde rossastro. Altre volte vedevamo campi rossi e verdi nello stesso posto ma a profondità differenti. Era come se vedessimo una tonalità attraverso l'altra senza che nessuna delle due scolorisse. E spesso vedevamo un verde rossastro o un giallo bluastro che riempiva l'intero campo.

Curiosamente, a esperimento concluso, due soggetti hanno riferito di aver visto il verde rossastro e il giallo bluastro nella loro immaginazione, anche se questa visione immaginaria svaniva presto. Possiamo allora rispondere alla domanda posta dal filosofo David Hume nel 1739, ovvero: «È possibile percepire un colore nuovo»? La risposta è sì. Solo che i nuovi colori erano composti da colori familiari.

I risultati ci hanno indotto a sviluppare un modello per spiegare l'origine dell'opponenza cromatica nel sistema visivo, senza affidarsi alla sottrazione dei circuiti neurali. Nel modello, popolazioni di neuroni competono per attivarsi, proprio come due specie per la stessa nicchia ecologica. Solo che i neuroni perdenti restano silenti, senza estinguersi. Una simulazione di questa competizione riproduce la classica opposizione dei colori: per ciascuna lunghezza d'onda i neuroni «rossi» o quelli «verdi», ma non entrambi, sono in condizioni di vincere, un fenomeno che vale anche per giallo e blu. Eppure, se la competizione viene a cadere – per esempio quando si inibiscono le connessioni tra popolazioni di neuroni – colori in precedenza rivali possono coesistere.

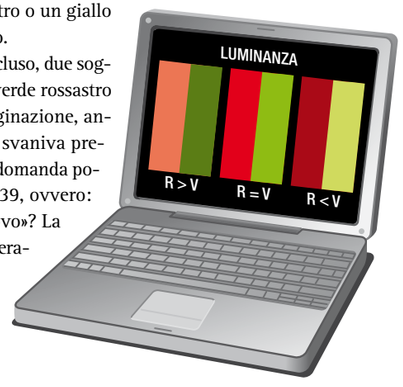
Il cervello a strisce

Nel nostro esperimento, quando i campi rosso-verde o giallo-blu differivano significativamente per luminanza non vedevamo i colori proibiti. Vedevamo, invece, tessiture. Per esempio riflessi verdi su un campo rosso o striature blu sul campo giallo, proprio come avevano riferito Crane e Piantanida di alcuni loro soggetti. Forse i due avevano usato immagini colorate equiluminanti per alcuni soggetti, ma non equiluminanti per altri.

I disegni illusori punteggiati o striati che vedevamo erano curiosi. Il loro studio in altri contesti è

LUMINANZA

La visione dei colori proibiti può essere aiutata dalla percezione con uguale luminanza – che è simile alla luminosità – dei due campi colorati mostrati. Due colori sono equiluminanti quando un loro rapido scambio provoca una minima sensazione di sfarfallio. Illustrare la luminanza sulla carta è difficile perché ognuno di noi ha percezioni della luminanza differenti, e la stampa introduce cambiamenti nella saturazione dei colori, insieme a variazioni di luminosità.

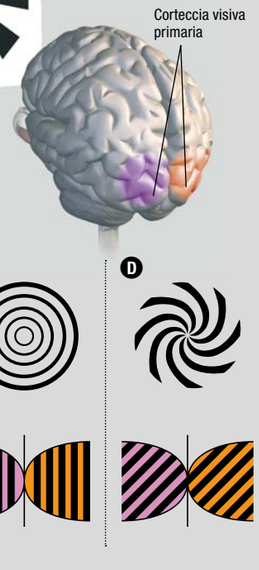


GLI AUTORI

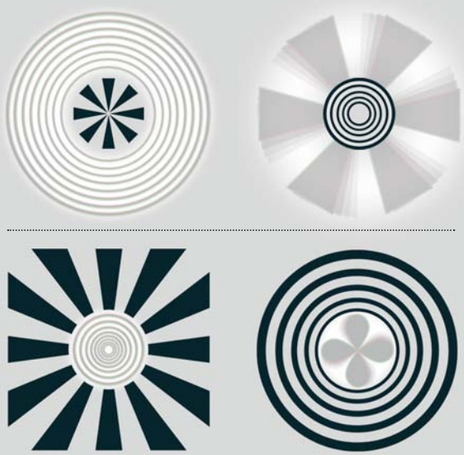
VINCENT A. BILLOCK e **BRIAN H. TSOU** sono biofisici che hanno applicato i principi della teoria della complessità a problemi della visione cromatica e spaziale nell'uomo. Svolgono insieme attività di ricerca alla base dell'aeronautica Wright-Patterson, in Ohio. Billock è *lead scientist* alla General Dynamics di Dayton, in Ohio. Tsou è *principal scientist* al Laboratorio di ricerca della U.S. Air Force. Tsou non può vedere il rosso verdastro perché è daltonico per rosso e verde, una condizione che lo ha motivato a studiare la visione dei colori.

Allucinazioni controllate

Se vi è capitato di viaggiare su un'auto lungo un viale alberato e di tenere gli occhi chiusi, probabilmente avrete sperimentato lo «sfarfallio», cioè la rapida oscillazione tra luce e buio. Spesso lo sfarfallio in un campo visivo vuoto (come il retro delle palpebre) induce allucinazioni fugaci di strutture geometriche, tra cui cerchi concentrici, spirali e forme a ventola, come raggi di una ruota. Lo studio dei processi cerebrali svelati da queste illusioni potrebbe migliorare se i ricercatori riuscissero a stabilizzare le allucinazioni e a controllare il tipo di figura percepita dal soggetto.



▼ La risposta del cervello a esempi reali di strutture fornisce indizi sulle basi neurali delle illusioni dello sfarfallio. Molte strutture innescano l'attività lungo strisce di neuroni nella corteccia visiva primaria (*a destra*). Quando guardiamo la struttura di una ventola si attivano strisce orizzontali (*in basso, a*). Cerchi concentrici eccitano strisce verticali (*c*), e le spirali eccitano strisce oblique (*b, d*). Presumibilmente le allucinazioni geometriche emergono quando lo sfarfallio stimola la corteccia visiva primaria e le eccitazioni si auto-organizzano in strutture a strisce.



▶ Per controllare le allucinazioni da sfarfallio delle persone, gli autori hanno mostrato ai soggetti piccole forme (*in nero*) e hanno fatto sfarfallare la luce nell'area vuota circostante (*in alto*). I soggetti vedevano allucinazioni (*in grigio*) di cerchi intorno a forme reali di ventole e forme rotanti di ventole intorno a cerchi reali. Effetti simili si manifestavano con un'area sfarfallante vuota interna alle figure reali (*in basso*). Questi effetti sono analoghi a una regione rossa che fa sembrare un'area grigia adiacente tinta di verde (il colore opponente del rosso): i cerchi e le forme a ventola si comportano da figure «opponenti».

interessante. Sono disegni che emergono in particolari miscele di reagenti chimici, in cui le sostanze si diffondono in modo asimmetrico o con velocità differenti. Il matematico Alan Turing aveva introdotto questi sistemi di reazione-diffusione come sistemi matematici da studiare. Questi sistemi riproducono le strisce delle zebre, la pelle maculata del leopardo, le strutture geometriche di svariati fenomeni biologici, allucinazioni comprese.

Le allucinazioni visive caratterizzate da disegni geometrici sono generate da molti fattori, quali droghe, emicranie, attacchi epilettici e – il nostro preferito – uno stimolo visivo chiamato «sfarfallio del campo vuoto». Negli anni trenta dell'Ottocento David Brewster (inventore del caleidoscopio) aveva scoperto le allucinazioni indotte da sfarfallio. Brewster vedeva queste allucinazioni quando sfrecciava a occhi chiusi a fianco di una staccionata esposta alla luce. La staccionata produceva infatti rapidi lampi di luce e di buio («sfarfallio») sul retro delle palpebre. Oggi è più facile replicare l'effetto chiudendo gli occhi quando si è su un'auto lungo un viale alberato o, meglio ancora, guardando lo schermo di un computer.

Le comuni allucinazioni geometriche prodotte dallo sfarfallio includono forme a ventola, cerchi concentrici, spirali, ragnatele e nidi d'ape. Nel 1979 Jack D. Cowan, dell'Università di Chicago, e il suo studente, G. Bard Ermentrout, oggi all'Università di Pittsburgh, avevano notato che queste immagini corrispondevano all'eccitazione di strutture striate di neuroni nella corteccia visiva primaria, una regione cerebrale specializzata nella visione. Per esempio quando guardiamo cerchi concentrici si attivano strisce verticali di neuroni. Una geometria a forma di ventola, per esempio i raggi di una ruota, eccita strisce orizzontali di neuroni, e le spirali eccitano strisce oblique.

In questo modo Ermentrout e Cowan potevano spiegare molte allucinazioni geometriche riferite dai soggetti se la corteccia visiva generava spontaneamente strutture a strisce di attività neurale come risposta a uno sfarfallio. Nel 2001 Cowan ha ampliato il modello per spiegare altre forme complicate. Ma i risultati non offrono un metodo per indurre una qualsiasi allucinazione in modo da studiarla in dettaglio. In effetti, le forme indotte dallo sfarfallio sono instabili e imprevedibili allo stesso tempo, forse perché ciascun *flash* perturba l'allucinazione provocata in precedenza. Sarebbe molto utile disporre di una tecnica capace di provocare una specifica allucinazione in modo stabile per osservarla a lungo. A quel punto le allucinazioni e la matematica di Turing schiuderebbero una finestra sulla dinamica del sistema visivo umano.

Per stabilizzare le figure indotte dallo sfarfallio ci siamo ispirati ad altri sistemi che formano spontaneamente figure e che possono diventare prevedibili introducendo distorsioni *ad hoc*. Per esempio, immaginate una padella con un velo d'olio, scaldata dal basso e raffreddata dall'alto. Se la differenza di temperatura è grande a sufficienza, l'olio bollente in salita e l'olio raffreddato in discesa si auto-organizzeranno in figure a cilindri orizzontali, che, viste dall'alto, appariranno simili a strisce. Ciascun cilindro ruota intorno al proprio asse, a causa del fluido che sale da un lato e scende dall'altro. Se i cilindri adiacenti ruotano in direzioni opposte, come ruote dentate, le figure sono stabili.

L'orientamento dei cilindri, cioè la direzione delle «strisce», è determinato dal caso durante la formazione della figura. Ma se iniettiamo un fluido dal basso allora la configurazione dei cilindri si evolverà fino ad allinearsi con il fluido stesso. Sviati da questa analogia, volevamo capire se un disegno vicino a un'area vuota sfarfallante avrebbe stabilizzato le allucinazioni percepite dai soggetti. Negli esperimenti abbiamo mostrato piccole figure in forma circolare o di ventola, illuminate con una luce che lampeggiava rapidamente nell'area vuota. Le strutture avrebbero eccitato strisce con un orientamento specifico nella corteccia visiva, e ci aspettavamo che le eccitazioni indotte dall'area sfarfallante avrebbero ampliato il disegno con l'aggiunta di strisce parallele. Pensavamo, quindi, che i soggetti avrebbero percepito i disegni circolari e le forme a ventola estese all'area sfarfallante.

Ventole e cerchi

Con grande sorpresa, i soggetti hanno percepito l'effetto opposto. I piccoli cerchi erano sempre circondati da forme illusorie di ventole, che ruotavano con una frequenza di circa un giro al secondo. Viceversa, lo sfarfallio intorno a piccole forme di ventole evocava allucinazioni di figure circolari che in alcuni casi pulsavano. E ottenevamo risultati simili quando la figura circondava un centro vuoto e sfarfallante. In tutti i casi, l'allucinazione era confinata all'area sfarfallante: si estendeva alla figura solo se facevamo apparire e scomparire lo sfarfallio in sincronia con la luce nell'area vuota.

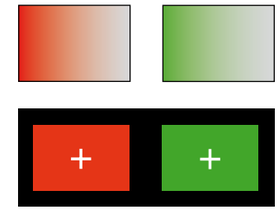
Con il senno di poi questo esito non avrebbe dovuto sorprenderci. Cinquant'anni fa Donald M. MacKay, del King's College di Londra, aveva mostrato che, quando forme di ventilatori sono osservate in una luce sfarfallante, appare una debole struttura di anelli concentrici che si sovrappone alla ventola, e viceversa. Il risultato di McKay si può interpretare come il prodotto di una forma di opponenza. Per capire questo aspetto, considerate che cosa succede quando vedete un lampo brillante di luce rossa: vedete un'immagine postuma verde, perché il verde è opponente al rosso. Se il sistema visivo elabora forme di ventole e di cerchi concentrici come forme geometriche opponenti, allora i disegni deboli percepiti nell'illusione di MacKay possono essere immagini postume geometriche presenti durante gli istanti di buio tra i lampi.

La nostra nuova illusione ha anche un corrispondente fenomeno cromatico: un campo rosso fa apparire verdognolo un campo grigio adiacente. Nelle corrette condizioni dinamiche – il nostro apparato di sfarfallio – una figura induce la figura opponente nel campo vuoto vicino. In altre parole, l'illusione di MacKay prevede l'opponenza geometrica separata nel tempo: ventole e cerchi sono presenti in momenti distinti. Il nostro effetto, invece, è un'opponenza geometrica separata nello spazio: ventole e cerchi si trovano in regioni adiacenti.

Anche se possono sembrare elucubrazioni astratte, i colori proibiti e le allucinazioni geometriche indotte illustrano aspetti importanti della visione e della natura delle opponenze percettive. I colori proibiti rivelano che l'opponenza cromatica – utile come modello di tutte le opponenze percettive – non è rigidamente cablata come pensavano gli psicologi. E che meccanismi di cablaggio meno rigidi, come il nostro modello della competizione, potrebbero essere necessari per capire a fondo come il cervello gestisce i colori opponenti.

Esperimenti che stabilizzano le allucinazioni geometriche rivelano che, nonostante l'aspetto bizzarro, queste allucinazioni si comportano in modo simile ai familiari effetti visivi dei colori. Inoltre la natura neurale delle opponenze geometriche è molto interessante. I disegni opponenti implicano strisce perpendicolari di neuroni eccitati nella corteccia visiva. È un indizio dei meccanismi usati dai circuiti neurali per produrre l'opponenza? Per rispondere dovremo concepire nuovi modi per spingere il sistema visivo al limite, e oltre. ■

LO VEDI?



La visione binoculare ci permette di vedere colori proibiti. Provate a fissare le due coppie di rettangoli, incrociando gli occhi in modo che l'area rossa e quella verde si sovrappongano (nella coppia in basso fate in modo che le croci si fondano). I colori fusi competono a chiazze, in modo instabile. Quando le chiazze cambiano colore alcune persone percepiscono sprazzi di verde rossastro proibito, ma il metodo è assai meno affidabile rispetto all'uso di immagini equiluminanti stabilizzate.

➡ Letture

On Seeing Reddish Green and Yellowish Blue. Crane H.D. e Piantanida T.P., in «Science», Vol. 221, pp. 1078-1080, 1983.

Perception of Forbidden Colors in Retinally Stabilized Equiluminant Images: An Indication of Soft-wired Cortical Color Opponency? Billock V.A., Gleason G.A. e Tsou B.H., in «Journal of the Optical Society of America», Vol. 18, pp. 2398-2403, ottobre 2001.

What Do Catastrophic Visual Binding Failures Look Like? Billock V.A. e Tsou B.H., in «Trends in Neurosciences», Vol. 27, pp. 84-89, febbraio 2004.

Neural Interactions between Flicker-Induced Self-Organized Visual Hallucinations and Physical Stimuli. Billock V.A. e Tsou B.H., in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 104, pp. 8490-8495, maggio 2007.

Alain Daussin/Getty Images (*bambina nella macchina*); George Retseck (*cervello*); Catherine Wilson (*illusioni geometriche*)

Jen Christiansen, fonte: Jeffery K. Hovis, Università di Waterloo

Gli scienziati hanno stabilito limiti per i nove principali processi ambientali. Se fossero superati, la Terra potrebbe diventare inabitabile. Purtroppo, tre di essi sono già stati oltrepassati

Limiti per un pianeta sano

di Jonathan Foley

IN SINTESI

- Benché il problema del cambiamento climatico attiri gran parte dell'attenzione del pubblico e dei media, ci sono problemi ambientali più preoccupanti, come la perdita di biodiversità e l'inquinamento da azoto. E altri processi ambientali si stanno avvicinando alla soglia critica.
- Per rendere più sostenibile il pianeta, e la sopravvivenza della specie umana su di esso, è indispensabile passare subito alle fonti di energia a basse emissioni di carbonio, ridurre la deforestazione e rivoluzionare le pratiche agricole.

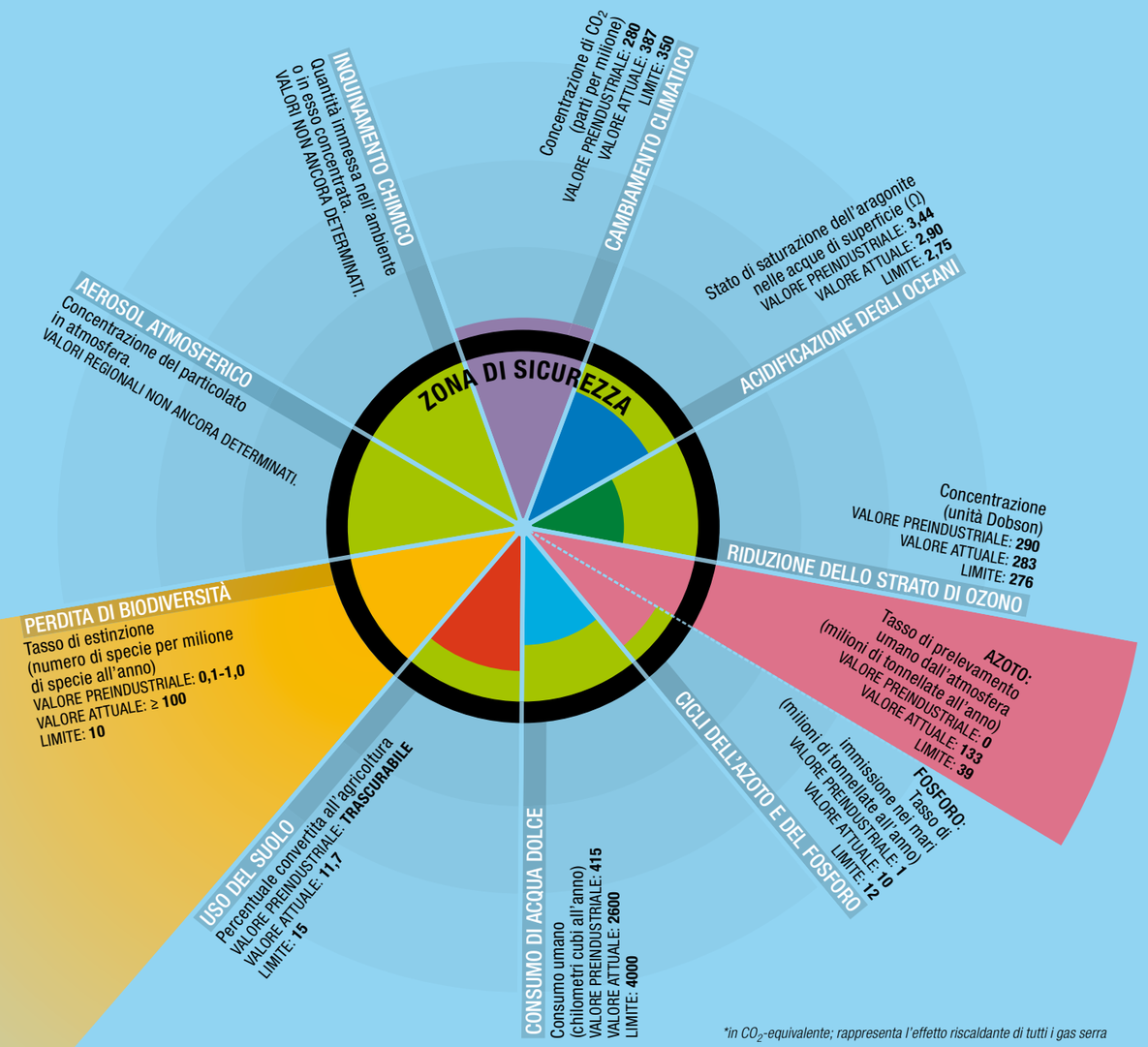
Per quasi 10.000 anni, dalla nascita della civiltà e per tutto l'Olocene, il mondo è apparso incredibilmente vasto. Sconfinate foreste e immensi oceani offrivano quantità infinite di risorse. Gli esseri umani potevano inquinare liberamente, ed evitare le conseguenze spostandosi altrove. Ma grazie ai progressi della salute pubblica, alla rivoluzione industriale e, in tempi più recenti, alla rivoluzione verde, la popolazione mondiale è passata dai 500 milioni del 1800 ai quasi 7 miliardi di oggi. Negli ultimi cinquant'anni il numero degli esseri umani è più che raddoppiato, e il nostro sfruttamento delle risorse ha raggiunto livelli incredibili: il consumo globale di cibo e acqua dolce è più che triplicato, e il consumo di combustibili fossili è quadruplicato. L'umanità usa da un terzo a metà di tutta la fotosintesi che avviene sulla Terra.

Questa crescita sfrenata ha trasformato l'inquinamento da un problema locale a un assalto di dimensioni planetarie. L'assottigliamento dello strato di ozono e l'elevata concentrazione di gas serra sono due dei problemi più noti, ma stanno emergendo molti altri effetti negativi. L'improvvisa accelerazione della crescita demografica, del consumo di risorse e dei danni ambientali ha cambiato la Terra. Oggi viviamo in un mondo «pieno», con risorse limitate e ridotta capacità di assorbire gli scarti. Perciò anche le regole per vivere il pianeta sono cambiate. Dobbiamo intervenire in modo da vivere all'interno della «zona di sicurezza» dei nostri sistemi ambientali. Se non rivedremo il nostro modo di agire, provocheremo cambiamenti ambientali catastrofici che potrebbero avere conseguenze disastrose per l'umanità.

Che cosa potrebbe causare questi cambiamenti ? E come possiamo evitarli? Recentemente un team internazionale di scienziati – guidato da Johan Rockström dello Stockholm Resilience Center, in Svezia, comprendeva ricercatori europei, statunitensi (tra cui me) e australiani – ha provato a rispondere a questi interrogativi ponendosi una domanda ancora più ampia: ci stiamo avvicinando a una serie di «punti di non ritorno» planetari che modificheranno l'ambiente in modi mai verificatisi nel corso della storia umana?

Dopo aver esaminato numerosi studi interdisciplinari sui sistemi fisici e biologici, il team ha individuato nove processi ambientali che potrebbero alterare drasticamente le capacità del pianeta di sostenere la vita umana. Per ciascuno di questi processi sono stati stabiliti limiti all'interno dei quali l'umanità può ritenersi al sicuro. Sette di essi hanno valori di soglia molto chiari, definiti in maniera scientifica per mezzo di un numero: cambiamento climatico, perdita di biodiversità, inquinamento da azoto e fosforo (riuniti sotto un'unica voce poiché tendono a verificarsi insieme), riduzione dell'ozono della stratosfera, acidificazione degli oceani, consumo globale di acqua dolce e uso globale del suolo. Gli altri due processi, inquinamento dovuto all'aerosol atmosferico e inquinamento chimico globale, non sono stati studiati a sufficienza per stabilire limiti numerici precisi.

Secondo questa analisi, la Terra ha già oltrepassato i limiti in tre casi: perdita della biodiversità, inquinamento da azoto e cambiamento climatico. Ma anche negli altri processi per cui è stato stabilito un limite numerico la tendenza è inequivocabilmente verso il raggiungimento della soglia. I singoli valori potrebbero avere bisogno di piccoli aggiustamenti, e nuovi processi potrebbero venire aggiunti in futuro, ma si tratta comunque di un primo indice dei problemi ambientali più pericolosi e di una base di partenza per pensare a come gestirli.



*in CO_2-equivalente; rappresenta l'effetto riscaldante di tutti i gas serra

Il problema dei combustibili fossili

Capire le cause dei problemi ambientali più urgenti ci mette sulla buona strada per risolverli. Per due di essi (cambiamento climatico e acidificazione degli oceani) una causa è fin troppo familiare: l'uso dei combustibili fossili, che liberano anidride carbonica (CO_2) nell'atmosfera.

Cambiamento climatico. La Terra sta già subendo un significativo riscaldamento dovuto all'attività umana, e scienziati e governanti sono alla ricerca di strategie per evitarne le conseguenze più devastanti, come la scomparsa delle calotte polari e l'alterazione dei sistemi meteorologici regionali. Già oggi la concentrazione della sola CO_2 è di 387 parti per milione (ppm), e si continua a discutere su quali siano i livelli complessivi di gas serra in grado di causare cambiamenti pericolosi; i valori ipotizzati vanno da a 350 a 550 ppm di CO_{2e} («anidride carbonica equivalente», che esprime la concentrazione di tutti i gas serra combinati). Nella nostra analisi, suggeriamo un prudente obiettivo a lungo termine di 350 ppm per tenere il pianeta lontano dai valori soglia climatici. Per raggiungerlo, bisogna attivarsi subito per stabilizzare le emissioni di gas serra e, nei prossimi decenni, ridurle ben al di sotto dei livelli attuali.

Acidificazione degli oceani. È il parente meno noto del cambiamento climatico. L'aumento della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera si accompa-

TUTTI I PRINCIPALI PROCESSI ambientali dovrebbero restare all'interno di certi limiti, in modo da non compromettere la zona di sicurezza entro cui l'umanità è in grado di esistere. Le zone colorate indicano quanto è aumentato un processo rispetto ai livelli preindustriali, fino a raggiungere o superare il valore di soglia. Per la biodiversità, l'azoto e il cambiamento climatico, i limiti sono già stati oltrepassati.

Verso il limite

Permettere ai processi ambientali di oltrepassare certi limiti può avere conseguenze molto pericolose. Per evitarle, è necessario agire per mantenere questi processi entro la soglia di sicurezza. (Per maggiori informazioni, si veda *Soluzioni per le sfide ambientali*, a p. 50).

PROCESSO AMBIENTALE	CONSEGUENZE SE SUPERATO	POSSIBILI SOLUZIONI
Perdita di biodiversità	Collasso degli ecosistemi terrestri e marini	Ridurre la deforestazione e lo sviluppo; pagare per i servizi ambientali
Ciclo dell'azoto	Espansione delle zone morte in laghi e mari	Ridurre l'uso di fertilizzanti; trattare i residui animali; passare ai veicoli ibridi
Ciclo del fosforo	Alterazione delle catene alimentari marine	Ridurre l'uso di fertilizzanti; trattare i residui animali; trattare meglio i residui umani
Cambiamento climatico	Scioglimento di ghiacciai e poli; alterazioni climatiche locali	Passare a fonti e combustibili a basso contenuto di carbonio; tassare le emissioni di carbonio
Uso del suolo	Collasso dei biomi	Limitare l'espansione urbana; migliorare l'efficienza agricola; pagare per i servizi ambientali
Acidificazione degli oceani	Morte di microrganismi e coralli; riduzione dell'assorbimento del carbonio	Passare a fonti e combustibili a basso contenuto di carbonio; ridurre il dilavamento dei fertilizzanti
Consumo di acqua dolce	Danni a vegetazione e colture	Migliorare l'efficienza dell'irrigazione; installare sistemi a flusso ridotto
Riduzione dell'ozono della stratosfera	Danni da radiazioni su umani, animali e piante	Eliminare gli idroclorofluorocarburi; testare gli effetti di nuovi composti chimici

gna a un aumento di CO_2 che si dissolve in mare sotto forma di acido carbonico, rendendo più acide le acque superficiali. Con un pH 8,2, gli oceani sono naturalmente basici, ma i dati indicano che il valore è già sceso a quasi 8,0 e continua a diminuire. L'indicatore da noi scelto per quantificare il danno prodotto da questo cambiamento è il livello dell'aragonite, un minerale simile al carbonato di calcio, negli strati d'acqua più superficiali. Molti organismi, dai coralli a molte specie di fitoplancton, dipendono dall'aragonite per formare il proprio scheletro o conchiglia. Un aumento dell'acidità può indebolire gravemente gli ecosistemi marini e le catene alimentari: un'altra ragione per ridurre il consumo di combustibili fossili.

Cibo poco sostenibile

Benché l'umanità sfrutti già il 35 per cento delle terre emerse per l'agricoltura e l'allevamento, la prima causa di deforestazione è la creazione di nuove coltivazioni. Diversi limiti planetari sono a rischio di essere superati a causa dell'uso che facciamo del suolo.

Perdita di biodiversità. Lo sviluppo umano sta causando una delle più grandi estinzioni della storia. Il tasso di scomparsa delle specie è da 100 a 1000 volte più alto rispetto ai tassi naturali osservati nei reperti geologici. L'estinzione riguarda sia gli ecosistemi terrestri sia quelli marini, e potrebbe alterare i processi ecologici su scala regionale e globale. Serve maggiore impegno nella conservazione della biodiversità, soprattutto nelle foreste tropicali. Iniziative come il programma REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation) dell'ONU, che sviluppa finanziamenti per rallentare l'abbattimento delle foreste tropicali, permettono di affrontare contemporaneamente la perdita di biodiversità e le emissioni di carbonio, e potrebbero risultare molto efficaci.

Inquinamento da azoto e fosforo. La diffusione dei fertilizzanti industriali ha sconvolto la chimica del pianeta, raddoppiando i flussi di fosforo e azoto negli ecosistemi, fino a livelli di circa 121 milioni di tonnellate di azoto e 9 milioni di tonnellate di fosforo all'anno. Entrambe le sostanze stanno causando un diffuso inquinamento idrogeologico, degradando numerosi laghi e fiumi e sconvolgendo le aree costiere marine in cui sono sorte vaste «zone morte» con bassi livelli di ossigeno. Servono nuove pratiche agricole che incrementino la produzione senza danneggiare l'ambiente.

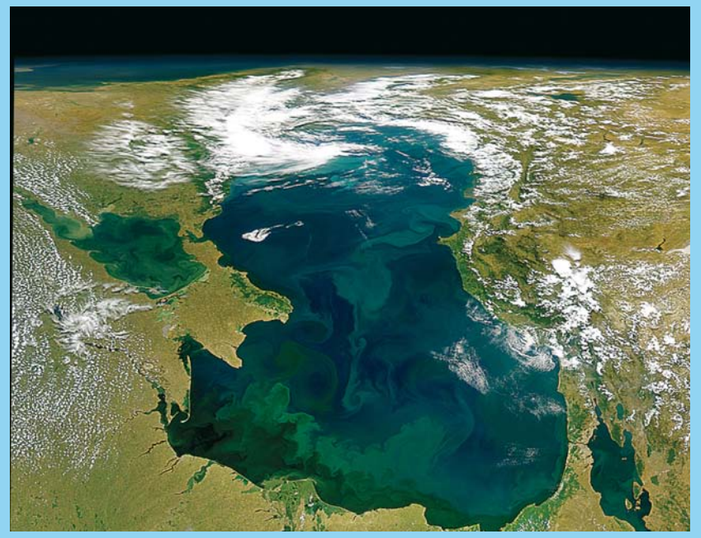
Esaurimento dell'acqua dolce. Ogni anno preleviamo 2600 chilometri cubi di acqua dolce da fiumi, laghi e falde acquifere per irrigazione (70 per cento), industria (20 per cento) e usi domestici (10 per cento). Per questo la portata di molti grandi fiumi è ridotta, e alcuni si stanno addirittura prosciugando. La futura domanda di acqua dolce potrebbe essere enorme, perciò è necessario migliorare drasticamente l'efficienza del suo uso.

L'articolo pubblicato pochi mesi fa su «Nature» dal nostro gruppo ha stimolato un vivace dibattito scientifico. Il lavoro è stato accolto piuttosto positivamente e per ciò che è: un esperimento mentale che cerca di definire dei limiti da non superare nello sfruttamento dell'ambiente. Qualcuno ha criticato il fatto stesso di voler porre dei limiti, mentre altri sono in disaccordo sui numeri.

L'AUTORE

Cortesia Joe Treleven (*Foley*)

JONATHAN FOLEY è direttore dell'Institute of Environment dell'Università del Minnesota. Dopo una formazione come scienziato dell'atmosfera, oggi lavora principalmente alla connessione esistente tra l'uso del suolo, l'agricoltura e l'ambiente globale.



Cortesia SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center e Orbimage

LE ENORMI FIORITURE DI ALGHE (*vortici verdi in basso*) che caratterizzano il Mar Nero sono provocate dal dilavamento delle sostanze usate in agricoltura, che vengono trasportate dal Danubio (*in basso nella foto*) e minacciano gli ecosistemi acquatici. Si tratta di un esempio dell'interconnessione esistente tra i vari processi ambientali, in questo caso l'uso del suolo e la biodiversità.

L'obiezione forse più importante, tuttavia, riguarda il rischio che, fissando dei limiti, si possa pensare che la distruzione dell'ambiente sia accettabile finché rimane entro quei valori. Non è questo che volevamo dire. Non bisogna aspettare di arrivare al limite prima di reagire. Teniamo conto che già passando da un terzo del valore limite a due terzi si produrrebbero danni importanti. Chiediamo perciò alle persone di essere sufficientemente intelligenti e altruiste (nei confronti delle generazioni future) da non rendere la situazione peggiore di quanto già non sia. È importante rimanere il più lontano possibile dai limiti, perché ognuno di essi rischia di trasformarsi in una crisi ambientale.

La maggior parte delle critiche che abbiamo ricevuto è stata intelligente, e molte di esse erano in realtà già state previste. Sapevamo che il concetto di limite avrebbe richiesto studi più approfonditi, soprattutto per quanto riguarda le cifre, sulle quali stiamo infatti continuando a lavorare. Ritenevamo però che il concetto di base fosse interessante, e che avrebbe aiutato a formare un'opinione collettiva sui limiti ambientali dell'esistenza umana. Speravamo inoltre che i risultati avrebbero avviato una discussione all'interno della comunità scientifica, cosa che sembra essere avvenuta.

Possibili soluzioni

Se si vuole risolvere i problemi economici, sociali e ambientali legati alla sostenibilità globale, bisogna necessariamente rispettare una serie di limiti nel nostro rapporto con il pianeta. Alcune questioni hanno iniziato a essere affrontate, ma in modo frammentario, considerando indipendentemente ciascun limite, mentre sono fortemente interconnessi. Quando si oltrepassa una soglia aumenta la pressione sulle altre, e il rischio di produrre un altro sforamento è maggiore. Per esempio, se il limite per il cambiamento climatico venisse superato, probabilmente aumenterebbe il tasso di estinzione. Ancora, l'inquinamento da fosforo e azoto può compromettere la resilienza degli ecosistemi acquatici, accelerando enormemente la perdita di biodiversità. Se cercheremo di risolvere un problema alla volta probabilmente falliremo.

In un periodo così critico, gli scienziati non possono limitarsi a definire i problemi, ma devono anche iniziare a proporre soluzioni. Queste sono alcune delle nostre idee:

- Passare a un sistema energetico efficiente e a basso consumo di combustibili fossili. Il cambiamento climatico e l'acidificazione degli oceani impongono di stabilizzare le concentrazioni di CO_2 il prima possibile, preferibilmente al di sotto delle 350 ppm. Questa transizione richiederà miglioramenti nell'efficienza energetica e un rapido sviluppo delle fonti di energia a basse emissioni.

- Ridurre drasticamente la deforestazione e il degrado del suolo, soprattutto nelle foreste tropicali. Molti dei limiti planetari, soprattutto quelli per la biodiversità, rischiano di essere compromessi dall'espansione continua degli insediamenti umani.

- Investire in pratiche agricole rivoluzionarie. Diversi valori di soglia, tra cui quelli dell'inquinamento delle acque e del consumo di acqua dolce, dipendono dai nostri sistemi agricoli. Nuovi approcci sono possibili, con nuove varietà vegetali e tecniche agricole di precisione, oltre che con un uso più efficiente dell'acqua e dei fertilizzanti.

Non ci sono sistemi semplici per rendere il futuro più sostenibile. Con l'esperienza svilupperemo nuovi principi da applicare all'economia, alla politica e alla società, sempre però consapevoli che la nostra comprensione dei processi ambientali e umani è limitata. Grazie ai risultati raggiunti e alle innovazioni disponibili saremo in grado di reagire ai mutamenti ambientali e alle nuove necessità della società, migliorando la resilienza dei sistemi naturali e umani in modo da renderli più robusti e meno vulnerabili agli shock che molto probabilmente si verificheranno. Fino ad allora, però, dovremo fare del nostro meglio per adattarci a vivere entro i limiti di un pianeta sempre più stretto. ■

➥ Letture

A safe operating space for humanity. Rockström J. e altri, in «Nature», Vol. 461, pp. 472-475, 24 settembre 2009.

Commentaries: planetary boundaries. In «Nature Reports Climate Change», Vol. 3, pp. 112-119, ottobre 2009. **http://blogs.nature.com/climatefeedback/2009/09/planetary_boundaries.html.**

Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Rockström J. e altri, in «Ecology and Society», Vol. 14, n. 2, articolo 32, 2009. **www.stockholmresilience.org/planetary-boundaries.**

Soluzioni per le sfide ambientali

Le proposte di alcuni esperti per tenere sotto controllo i processi ambientali

PERDITA DI BIODIVERSITÀ

Gretchen C. Daily, *professore di scienze ambientali, Stanford University*

FORESTA PLUVIALE, COSTA RICA

Gli approcci tradizionali alla conservazione, da soli, sono destinati a fallire. Le riserve naturali sono troppo poche, piccole, isolate e soggette a cambiamenti per tutelare più di una piccola frazione della biodiversità del pianeta. La sfida è rendere la conservazione attraente, dal punto di vista economico e da quello culturale.

Non possiamo continuare a trattare la natura come una risorsa infinita. Dipendiamo dalla natura per la sicurezza alimentare, l'acqua pulita, la stabilità climatica, l'energia e molti altri servizi biofisici. Per mantenere questi benefici vitali non bastano poche riserve in località remote: bisogna creare ovunque «stazioni di servizio ecosistemiche». Alcuni stanno integrando conservazione e sviluppo umano. Il governo del Costa Rica paga i proprietari dei terreni per i servizi ecosistemici offerti dalle foreste tropicali, come la compensazione delle emissioni di carbonio, la produzione di energia idroelettrica, la tutela della biodiversità e il patrimonio paesaggistico. La Cina sta investendo 100 miliardi di dollari in «ecocompensazioni»: politiche e meccanismi di finanziamento innovativi che premiano la conservazione e il ripristino delle risorse. Inoltre, sta creando «aree di conservazione delle funzioni ecosistemiche» che copriranno fino al 18 per cento del territorio.

Tre fattori contribuirebbero all'adozione di questi modelli nel resto del mondo. Primo, nuove conoscenze e strumenti per valutare e gestire il capitale naturale, in termini biofisici, economici e così via. Per esempio il Natural Capital Project ha sviluppato InVEST, un software che integra la valutazione dei servizi ecosistemici con le compensazioni, e che può essere usato per pianificare lo sviluppo del suolo e delle risorse. Secondo, prove concrete di questi strumenti nella gestione delle risorse. Terzo, cooperazione tra i governi, le organizzazioni per lo sviluppo, le aziende e le popolazioni per aiutare le nazioni più povere a costruire economie più solide mantenendo nel contempo i servizi ecosistemici essenziali.

CICLO DELL'AZOTO

Robert Howarth, *professore di ecologia e biologia ambientale, Cornell University*

Le attività umane hanno profondamente alterato i flussi di azoto sul pianeta. Il fattore che più contribuisce in assoluto è l'uso dei fertilizzanti. In alcune regioni, però, per esempio nel nord-est degli Stati Uniti, la parte del leone spetta ai combustibili fossili. In questo caso la soluzione è conservare l'energia e usarla in maniera più efficiente. I veicoli ibridi sono una soluzione: le loro emissioni di azoto sono significativamente inferiori rispetto ai veicoli tradizionali, perché il motore si spegne durante le soste. Anche le emissioni di azoto provenienti dalle centrali elettriche statunitensi potrebbero essere ridotte, se gli impianti antecedenti al Clean Air Act fossero obbligati a mettersi in regola. Questi impianti inquinano decisamente troppo in relazione all'elettricità che producono.

In agricoltura sarebbe possibile usare meno fertilizzanti, con un calo delle rese minimo o addirittura nullo. Il dilavamento dei nutrienti è particolarmente problematico nei campi di mais, perché le radici di questa pianta penetrano per pochi centimetri nel terreno e assimilano le sostanze solo per due mesi all'anno. Il consumo di azoto potrebbe poi essere ridotto di un ulteriore 30 per cento o più se solo gli agricoltori piantassero colture invernali, come la segale o il frumento, che aiutano il suolo a trattenere l'azoto. Queste piante aumentano, tra l'altro, l'assorbimento del carbonio da parte del terreno, contribuendo a mitigare il cambiamento climatico. Ancora meglio sarebbe piantare specie perenni, come le erbacee, al posto del mais: in questo caso le perdite di azoto calerebbero notevolmente.

Un altro grosso problema è l'azoto proveniente dagli allevamenti intensivi. Negli anni settanta gli animali erano nutriti con mangimi di provenienza locale, e i loro residui venivano reimpiegati come concime. Oggi i mangimi provengono per la maggior parte da centinaia di chilometri di distanza, rendendo poco conveniente il ritorno del concime al campo.

La soluzione? Obbligare i proprietari degli allevamenti a trattare i residui, così come i Comuni devono trattare le acque reflue. Inoltre, se tutti mangiassimo meno carne, si genererebbero meno residui animali e ci sarebbe bisogno di meno fertilizzanti di sintesi. L'ideale sarebbe mangiare la carne di animali allevati all'aperto e nutriti con erbacee perenni.

La crescita improvvisa dell'uso dell'etanolo come biocarburante ha aggravato il problema. Diversi studi hanno confermato che, se gli obiettivi degli Stati Uniti sulla produzione di etanolo verranno rispettati, l'azoto che finirà nel fiume Mississippi e nel Golfo del Messico provocherà un'espansione del 30-40 per cento delle zone morte. L'alternativa migliore sarebbe abbandonare la produzione di etanolo dal mais. Se il paese vuole passare ai biocarburanti, bisognerebbe optare per erbe e alberi da bruciare per cogenerare calore ed elettricità. Le emissioni di azoto e di gas serra sarebbero notevolmente inferiori.

Doug Wechsler Animals Animals/Earth Scenes

Jen Christiansen (*grafica*); Imageplus/Corbis (*foto aerea*)

CICLO DEL FOSFORO

David A. Vaccari, *direttore del Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e marina, Stevens Institute of Technology*

L'aumento del benessere sta facendo crescere la domanda di fosforo più rapidamente della popolazione. Ai ritmi attuali, le riserve mondiali dureranno meno di un secolo. Abbiamo quindi due obiettivi: conservare il fosforo come risorsa e ridurre i danni agli ecosistemi costieri dovuti al suo dilavamento. Il flusso di fosforo più sostenibile per l'ambiente sarebbe quello naturale: sette milioni di tonnellate all'anno (Mt/y). Per raggiungere questo obiettivo soddisfacendo nel contempo il consumo umano (22 Mt/y), dovremmo riciclare o riutilizzare il 72 per cento del fosforo che usiamo. Ovviamente, se la domanda dovesse aumentare, questa percentuale dovrebbe crescere di conseguenza.

Molto potrebbe essere fatto con le tecnologie esistenti. Le tecniche agricole conservative, come il *no-till* e i terrazzamenti, consentirebbero di eliminare dai fiumi 7,2 Mt/y. Tutto il fosforo contenuto nei residui animali che attualmente non vengono riciclati (circa 5,5 Mt/y) potrebbe essere sostanzialmente eliminato se li impiegassimo come concime. Per i residui umani, le tecnologie permetterebbero il recupero del 50-80 per cento del fosforo, risparmiando ulteriori 1,05 Mt/y. Si tratta di azioni «facili», basate su tecnologie già disponibili. Ciò nonostante, permetterebbero di portare la quantità che finisce nei fiumi da 22 a 8,25 Mt/y, ossia poco al di sopra del flusso naturale.

CAMBIAMENTO CLIMATICO

Adele C. Morris, *responsabile politiche, progetto «Climate and Energy Economics», Brookings Institution*

Stabilire la concentrazione atmosferica accettabile dei gas serra può sembrare una decisione scientifica, ma implica una scelta economica, per valutare costi e benefici, e una scelta politica, per decidere chi pagherà. Servono quindi approcci che minimizzano i costi e mantengono alto il consenso. Il primo passo è evitare di alienare il consenso per inseguire risultati a breve termine: esistono soglie economiche e politiche oltre le quali gli elettori si arrabbiano.

Politiche climatiche basate sui prezzi possono aiutare a contenere i costi. A livello nazionale, un'opzione è una tassa sui gas serra di importo ragionevole ma crescente, oppure un sistema *cap-and-trade,* in cui i permessi di emissione vengono scambiati a prezzi che rientrano in un intervallo prestabilito, che aumenta nel tempo. Un intervallo di prezzi regolamentato manterrebbe il costo delle emissioni abbastanza alto da incentivare i programmi di abbattimento, ma limiterebbe i rischi per l'economia se i prezzi si rivelassero troppo alti. Anche gli accordi internazionali dovrebbero agire sui prezzi anziché imporre limiti fisici di emissione spesso impraticabili. Per esempio, un trattato sul clima potrebbe permettere ai paesi di imporre una tassa di entità convenuta. Questa flessibilità eliminerebbe il sospetto che il cap-and-trade sia un ostacolo alla lotta alla povertà nei paesi in via di sviluppo.

USO DEL SUOLO

Eric F. Lambin, *professore di scienze della Terra, Stanford University e Università Cattolica di Lovanio*

Per controllare l'impatto dello sviluppo umano, dovremmo prestare attenzione alla distribuzione globale delle colture. L'agricoltura intensiva dovrebbe concentrarsi solo sui terreni migliori, quelli che possono fornire rese elevate. Purtroppo, stiamo perdendo una parte significativa di questi terreni. Rischiamo di raggiungere un punto in cui ogni aumento della produzione di cibo (per non parlare dei biocarburanti) produrrà un rapido disboscamento delle foreste tropicali e di altri ecosistemi, oltre all'uso dei terreni marginali, quelli con le rese più basse.

Possiamo evitare di perdere i terreni migliori controllando il degrado del suolo, l'esaurimento dell'acqua dolce e l'espansione dei centri urbani. Questa fase richiederà una strategia a zone e l'adozione di pratiche agricole più efficienti, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Anche la domanda di terreni agricoli può essere ridotta: basta ridurre gli sprechi lungo le filiere alimentari, incoraggiare una crescita demografica più contenuta, garantire una distribuzione più equa del cibo e ridurre significativamente il consumo di carne nei paesi ricchi. È inoltre possibile riservare più terra per la natura adottando politiche forti di gestione del territorio, come ha fatto l'Unione Europea. Alcuni paesi in via di sviluppo (Cina, Vietnam, Costa Rica) sono riusciti a passare dalla deforestazione alla riforestazione grazie a strategie ambientali migliori, a una forte volontà politica di modernizzare l'uso del suolo, a cambiamenti culturali, alla regolamentazione dell'uso del suolo e a incentivi alla conservazione dei servizi ecosistemici. La sfida per queste nazioni è continuare su questa strada senza dover aumentare le importazioni di cibo.

CAMPI COLTIVATI E URBANIZZAZIONE

ACIDIFICAZIONE DEGLI OCEANI

Scott C. Doney, *ricercatore, Woods Hole Oceanographic Institution*

Gli oceani stanno diventando sempre più acidi a causa delle emissioni di CO_2,ma ci sono soluzioni a livello sia globale sia regionale e locale. Globalmente, dobbiamo fermare l'immissione di CO_2 nell'atmosfera e forse riportarne la concentrazione ai livelli preindustriali. Per farlo dobbiamo aumentare l'efficienza energetica, passare alle fonti rinnovabili e al nucleare, proteggere le foreste e studiare tecnologie per il sequestro del carbonio. Anche a livello regionale si può fare molto. Studi recenti indicano che il dilavamento dei fertilizzanti non solo crea zone morte nelle acque costiere, ma accelera anche l'acidificazione degli oceani. L'eccesso di nutrienti fa crescere più fitoplancton, che, morendo e decomponendosi, aggiunge altra CO_2 all'acqua. Per ridurre questa crescita bisogna usare i fertilizzanti in modo più efficiente e trattare i residui animali. Altre misure regionali riguardano la riduzione delle piogge acide. A livello locale sono state proposte diverse soluzioni. Le acque acide possono essere tamponate con calcare o con basi chimiche prodotte per via elettrochimica a partire da acqua marina e rocce. Più pratico sarebbe proteggere specifiche popolazioni di molluschi e acquacolture. In alcuni molluschi, infatti, come vongole e ostriche, le larve sembrano più sensibili degli adulti all'acidificazione, e nuovi studi suggeriscono che la reimmissione di conchiglie vuote nei fondali aiuterebbe a stabilizzare il pH, offrendo un appiglio migliore alle larve. Si prevede che la diminuzione del pH degli oceani continuerà ad accelerare, e che gli ecosistemi marini dovranno adattarvisi. Possiamo aiutarli riducendo l'inquinamento e la pesca indiscriminata, in modo da rendere questi ecosistemi più adatti a sopportare l'acidificazione mentre abbandoniamo gradualmente i combustibili fossili.

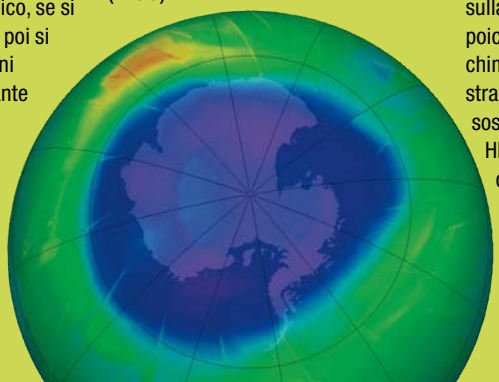
CONSUMO DI ACQUA DOLCE

Peter H. Gleick, *presidente, Pacific Institute*

IRRIGAZIONE A GOCCIA

Pochi osservatori ragionevoli negherebbero la necessità di fissare limiti al consumo di acqua dolce. Più difficile è invece stabilire con esattezza questi limiti e decidere come fare a rispettarli.
Un modo per introdurli è il concetto di picco dell'acqua, nelle sue tre diverse varianti. Il «picco delle acque rinnovabili» è il limite massimo di tutti i flussi rinnovabili all'interno di un bacino idrografico. Molti dei maggiori fiumi del mondo si stanno già avvicinando a questa soglia, che viene superata se l'evaporazione e il consumo sono maggiori del riempimento dovuto alle precipitazioni e ad altre fonti naturali. Il «picco delle acque non rinnovabili» si verifica laddove l'uso umano eccede di gran lunga i tassi naturali di ripristino, come è il caso delle falde acquifere fossili nelle Great Plains americane, in Libia, in India, nel nord della Cina e nella California centrale. In questi bacini il ritmo di estrazione aumenta inizialmente, ma poi diminuisce via via che i costi e gli sforzi necessari per ottenere la risorsa crescono (analogamente a quanto avviene con il petrolio).
Il «picco ecologico» è infine l'idea che, in ogni sistema idrologico, se si aumenta il prelievo prima o poi si raggiunge il punto in cui ogni beneficio economico derivante dall'estrazione viene annullato dalla distruzione ecologica che si produce. Sebbene questo punto sia difficile da quantificare con esattezza, è stato chiaramente superato in molti bacini, tra cui il Lago d'Aral, le Everglades, la California centrale e molti bacini idrografici della Cina. La buona notizia è che è possibile risparmiare acqua senza danneggiare la salute umana o la produttività economica. Per esempio migliorando l'efficienza idrica. È possibile produrre più cibo con meno acqua (e meno inquinamento idrogeologico) se si passa dalle tradizionali tecniche di irrigazione per allagamento all'irrigazione a goccia e agli spruzzatori di precisione, oltre a monitorare e gestire con maggiore attenzione l'umidità del suolo. Le centrali elettriche convenzionali possono passare dal raffreddamento ad acqua al raffreddamento a secco, e possono essere potenziate le fonti che hanno bisogno di pochissima acqua, come il fotovoltaico e l'eolico. Inoltre, in milioni di case è possibile sostituire apparecchiature poco efficienti con altre più moderne, per esempio lavatrici, WC e diffusori della doccia.

IL BUCO NELL'OZONO (*in blu*)



RIDUZIONE DELL'OZONO

David Fahey, *chimico, Earth System Research Laboratory, NOAA*

In vent'anni il Protocollo di Montreal per la protezione dell'ozono ha permesso di ridurre il consumo delle sostanze più dannose – principalmente clorofluorocarburi (CFC) e idrocarburi alogenati – del 95 per cento. Al 1° gennaio 2010 la produzione di queste sostanze era vietata nei 195 paesi che hanno firmato il protocollo, e lo strato di ozono dovrebbe ristabilirsi quasi del tutto entro la fine del secolo. Il protocollo prevede l'uso di sostituti temporanei, come gli idroclorofluorocarburi (HCFC), e il passaggio a composti che non causano danni, come gli idrofluorocarburi (HFC). Il successo dell'iniziativa dipenderà da vari fattori:

- Continuare a monitorare lo strato di ozono per rilevare eventuali cambiamenti e assicurarsi che le nazioni rispettino i regolamenti (per esempio, che gli HCFC vengano abbandonati entro il 2030).
- Mantenere attivo il Comitato di valutazione scientifica, che identifica le cause delle variazioni nello strato di ozono e valuta l'eventuale pericolosità delle nuove sostanze chimiche.
- Mantenere il Comitato di valutazione tecnologica ed economica, che fornisce informazioni sulle tecnologie alternative e sui composti sostitutivi, permettendo ai paesi di soddisfare la domanda di prodotti come frigoriferi, condizionatori e spray senza danneggiare l'ozono. I due comitati dovranno inoltre valutare il cambiamento climatico in relazione al ripristino dell'ozono. Il primo influisce infatti sulla quantità di quest'ultimo, poiché altera la composizione chimica e le dinamiche della stratosfera. Inoltre, i composti sostitutivi come gli HCFC e gli HFC sono gas serra, e la grande domanda di HFC prevista potrebbe avere conseguenze importanti sul clima.

Bob Rowan Progressive image/Corbis (*irrigazione*); cortesia Ozone Hole Watch/NASA (*globo*)

Sconfiggere il mito della crescita

L'unica soluzione per tutelare il futuro della nostra società è passare dalla crescita senza limiti alla gestione intelligente della ricchezza e delle risorse

Gli scienziati hanno proposto soluzioni convincenti per limitare specifici danni ambientali e rallentare il consumo di specifiche risorse. Secondo Bill McKibben, *visiting scholar* del Middlebury College e cofondatore di 350.org, gruppo che si occupa di sensibilizzare opinione pubblica e decisori politici all'azione contro il cambiamento climatico, per fermare davvero il degrado del pianeta dobbiamo mettere da parte l'ossessione della crescita economica.

Nel suo nuovo libro, *Eaarth. Making a Life on Tough New Planet*, McKibben scrive che oggi l'umanità vive in un mondo radicalmente diverso, che ha battezzato *Eaarth*. Questo pianeta non è più in grado di sostenere il modello di crescita economica che negli ultimi due secoli ha guidato la nostra società. Per evitare di collassare dobbiamo cercare di tenere un equilibrio tra grado di benessere e risorse, soprattutto muovendoci verso economie più sostenibili e localizzate.

Nel testo che segue, estratto da alcune parti del libro, McKibben espone la sua posizione. Nei box, riassunti da diversi capitoli, espone alcuni esempi di successo nella produzione locale di cibo e di energia.

la redazione

di Bill McKibben

Nuovi pianeti richiedono nuove abitudini. Se uscite dalla bolla d'aria della vostra base marziana e iniziate a respirare, non avrete certo una bella esperienza. Semplicemente, non possiamo vivere sulla nuova Terra come se fosse quella vecchia: è una possibilità che abbiamo cancellato.

Nel mondo in cui siamo cresciuti, l'abitudine politica ed economica più radicata era la crescita. Da Adam Smith in poi, per due secoli e mezzo, abbiamo pensato che «di più» volesse dire «meglio», e che la risposta a ogni problema fosse un'altra spinta all'espansione. La ragione è che questa strategia ha funzionato, almeno per un lungo periodo: le vite comode e relativamente sicure condotte da noi occidentali sono il prodotto di dieci generazioni di crescita economica costante. Ma ora che siamo bloccati tra una roccia esaurita e un posto caldo dobbiamo guardare al futuro con lucidità. Sul nostro nuovo pianeta la crescita economica potrebbe essere la prima grande abitudine a cui rinunciare in modo definitivo.

* * *

Adattato da Eaarth. Making a Life on a Tough New Planet, *di Bill McKibben, per gentile concessione di Times Books, Henry Holt and Company*
© Bill McKibben, 2010

George Retseck (*sfondo libro*)

“Possiamo creare condizioni migliori e durature per abitare questo nuovo pianeta, ma prima dobbiamo capire che il futuro non somiglierà al passato”

Mi rendo conto che è il momento peggiore per affrontare l’argomento. Il blocco temporaneo della crescita che chiamiamo recessione – in un’economica attrezzata solo per l’espansione – ha rovinato molte vite. Siamo fortemente indebitati, come singoli e come nazioni, e nel tentativo di uscire da questo disastro economico abbiamo scommesso ancora più denaro sulla possibilità di tornare a crescere, ancora una volta. Uno «stimolo economico» è proprio questo: una scommessa sulla capacità di riavviare la macchina della crescita e di avere come ritorno non solo la somma puntata, ma anche il debito che ha causato il problema.

Certo, il debito ecologico che dobbiamo affrontare è persino peggiore: l’anidride carbonica che si sta accumulando in atmosfera e sta modificando il pianeta. Anche in questo caso, la via d’uscita più ovvia è un nuovo ciclo di crescita, un’espansione dell’attività economica progettata per sostituire i nostri sistemi a combustibili fossili con altri che ci permetteranno di vivere come ora (o anche meglio!), ma senza anidride carbonica. Ci siamo aggrappati all’idea della «crescita verde» come soluzione dei nostri problemi.

Per la cronaca, sono favorevole a un Progetto Manhattan verde, a un New Deal ecologico, a una missione Apollo per la tecnologia pulita. Se avessi soldi, li darei ad Al Gore per investirli in aziende *start up*. Sono le ovvie e legittime risposte delle persone serie alla crisi più pericolosa che abbiamo mai affrontato, e stanno funzionando, davvero. Dobbiamo ridurre le emissioni di anidride carbonica del 30 per cento entro il 2020, o produrre tutta la nostra energia elettrica da fonti rinnovabili entro dieci anni, o centrare tutti gli obiettivi che le brave persone hanno identificato. Queste azioni sono esattamente il modo in cui il nostro sistema dovrebbe rispondere. Ma non riusciremo a farlo abbastanza velocemente da bloccare il cambiamento e salvare il pianeta su cui vivevamo. Non penso che il paradigma della crescita sia all’altezza della situazione; penso che il sistema abbia raggiunto il limite.

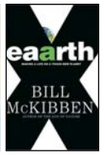
* * *

La prospettiva potrebbe sembrare un po’ triste. Ma possiamo creare condizioni durature, addirittura piacevoli, per abitare questo pianeta. Anzitutto dobbiamo renderci conto di dove siamo. Dobbiamo mitigare la nostra istintiva convinzione per cui il futuro sarà simile al passato e il nostro ottimismo riguardo a un futuro sempre più facile. Penso che ne siamo coscienti nel profondo, addirittura da prima che arrivasse la recessione di Bush. Per gli statunitensi, il momento cruciale è stato all’inizio del 2008, sei mesi prima che le grandi banche iniziassero a traballare, quando l’economia sembrava ancora rampante ma il costo della benzina era arrivato a quattro dollari al gallone.

Se il «sogno americano» ha una costante, questa è il movimento. Siamo arrivati da coste lontane, abbiamo attraversato il continente, abbiamo costruito autostrade, inventato il GPS che sta sul cruscotto a dirti che hai sbagliato strada. Tutto si muoveva. Poi, all’improvviso e per la prima volta, quel movimento si è inceppato. Ha cominciato a rallentare. Ogni mese gli statunitensi guidavano meno del mese precedente. Non potevi vendere la tua vecchia casa. Addirittura non potevi vendere nemmeno il tuo vecchio SUV.

Poi è cominciato qualcosa di strano. L’aumento del prezzo del petrolio ha reso meno conveniente il trasporto di merci su lunghe distanze. A maggio, spedire un *container* da Shanghai agli Stati Uniti costava 8000 dollari, all’inizio del 2000 ne costava 3000. Il volume delle merci trasportate ha iniziato a calare: Ikea ha aperto uno stabilimento in Virginia, non in Cina. «Sono state colte le opportunità più immediate della globalizzazione», ha scritto un’analista monetario della banca d’investimenti Morgan Stanley. Jeff Rubin, analista della CIBC World Markets di Toronto, è stato chiaro: «La globalizzazione è reversibile». Gli ordini delle acciaierie del Midwest sono aumentati, ha detto Rubin, proprio perché «gli alti costi di trasporto, prima per importare il ferro in Cina e poi per esportare l’acciaio lavorato dalla Cina verso altri paesi, hanno già eroso abbondantemente il vantaggio salariale, e di colpo hanno reso l’acciaio cinese non concorrenziale sul mercato degli Stati Uniti». Con l’aumento del prezzo del petrolio, e il conseguente incremento della domanda di etanolo, è aumentato anche il costo del cibo: all’improvviso, le nazioni hanno iniziato a pensare che il libero mercato non fosse così ciecamente ovvio come avevano sostenuto in precedenza.

L’AUTORE



BILL McKIBBEN è *visiting scholar* al Middlebury College, cofondatore del gruppo di attivisti per il cambiamento climatico 350.org e membro del Post Carbon Institute. È stato anche giornalista del «New Yorker» e ha scritto importanti libri sull’ambiente. È in uscita il suo ultimo saggio, *Eaarth. Making a Life on tough New Planet.*

Cortesia Nancie Battaglia

Soluzioni per il cibo locale

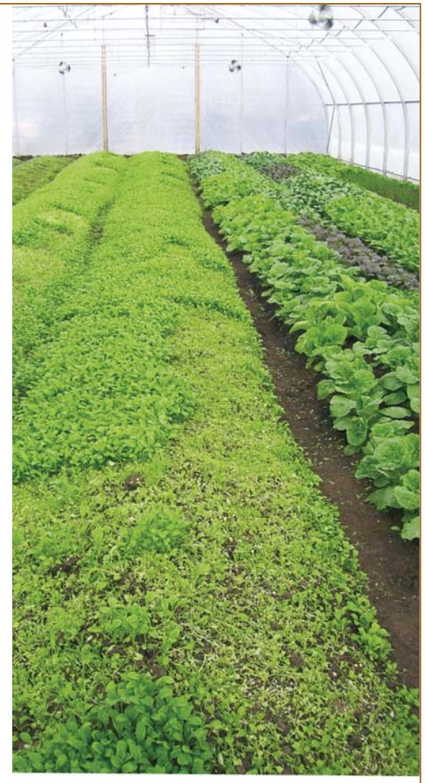
Negli ultimi 25 anni, a fronte della rapida diffusione dell’agricoltura industriale su larga scala, dei pesticidi e delle piante geneticamente modificate, la quantità di cibo pro capite è diminuita. Le persone serie hanno iniziato a ripensare l’agricoltura su piccola scala, per produrre molto cibo in fattorie relativamente piccole senza usare fertilizzanti sintetici o prodotti chimici.

Spesso la nuova agricoltura funziona meglio quando combina le nuove conoscenze con la saggezza antica. In Bangladesh, un nuovo metodo per l’allevamento dei polli produce non solo uova e carne, ma anche rifiuti usati come nutrienti in un lago da pesca, che a sua volta produce migliaia di chili di proteine ogni anno e una piantagione di giacinti d’acqua usati per cibare una piccola mandria di vacche il cui sterco alimenta un sistema di cottura a biogas.

In Malawi, piccoli laghi che riciclano gli scarti di una fattoria producono 1500 chilogrammi di pesce. In Madagascar, coltivatori di riso che collaborano con un gruppo di scienziati hanno trovato diversi modi per aumentare le rese. Le nuove piantine vengono trapiantate settimane prima del solito, con più spazio tra una e l’altra, e le risaie sono tenute all’asciutto per gran parte della stagione di crescita. Ciò comporta un’eliminazione più frequente delle erbacce, ma anche un aumento delle rese da quattro a sei volte. Il sistema è stato adottato da 20.000 agricoltori.

A Craftsbury, in Vermont, Pete Johnson ha progettato un pionieristico sistema di coltivazione permanente. Johnson ha costruito serre solari inventandosi un modo per muoverle su rotaie. Ora può coprire e scoprire diversi campi e crescere verdure per dieci mesi all’anno senza usare combustibili fossili, facendo funzionare tutto l’anno la sua fattoria che ha anche il sostegno della comunità.

Non sto sostenendo il cibo locale perché è più buono o migliore. Sostengo che non abbiamo scelta. In un mondo più incline a siccità e inondazioni abbiamo bisogno dell’elasticità di un campo con una trentina di vegetali diversi, non di un vasto oceano di mais o soia. In un mondo dove il caldo aumenta la diffusione degli infestanti abbiamo bisogno dell’elasticità di molte varietà e ceppi locali. E in un mondo con meno petrolio abbiamo bisogno delle piccole fattorie miste che possono prodursi i propri fertilizzanti e il proprio terreno agricolo.



UNA SERRA MOBILE permette alla fattoria di Craftsbury di far crescere le verdure per dieci mesi all’anno anche nel clima rigido del Vermont.

Nancy Baron (*la fattoria di Pete Johnson a Craftsbury*)

Proprio come abbiamo probabilmente osservato il picco del petrolio, è possibile che abbiamo osservato anche il picco della crescita economica, e quindi non riusciremo a far crescere ulteriormente il sistema. I costi delle assicurazioni sono cresciuti, il prezzo del petrolio aumenta, l’economia ristagna, il denaro per nuovi investimenti evapora, e quando l’economia riprende ad accelerare il prezzo del petrolio sale di nuovo. Secondo uno studio di McKinsey&Company del maggio 2009, un nuovo *shock* petrolifero è «inevitabile». Sciacqua, insapona, ripeti. Se non fosse che molti paesi iniziano a usare il carbone, perché è più economico. Quindi, sciacqua, insapona e rimani con la schiuma sulla testa, perché la temperatura che aumenta ha fatto evaporare le tue riserve.

* * *

Chi ha mai sognato che la crescita potesse finire? In realtà qualcuno l’ha fatto. In un’epoca molto diversa, quando Lyndon Baines Johnson era presidente, nella primavera dell’assassinio di Martin Luther King e del debutto del musical *Hair* a Broadway, alcuni industriali e scienziati europei si erano incontrati in una villa della capitale italiana. Il piccolo gruppo – il Club di Roma – voleva esaminare le tendenze globali generali, e aveva commissionato un rapporto a una squadra di giovani analisti del Massachusetts Institute of Technology.

Nel 1972, quando gli analisti aveva terminato il lavoro e pubblicato il rapporto *I limiti dello sviluppo*, era già stato celebrato il primo Earth Day, e Richard Nixon aveva creato l’Environmen-

Soluzioni energetiche locali

Dovrebbe essere chiaro che i combustibili fossili sono una definizione di che cosa è «troppo grande per fallire». Entro pochi anni dovremo cambiare fonti energetiche. In un mondo caotico, le fonti locali e diffuse funzionano meglio di quelle centralizzate.

Il primo passo è la conservazione. Nel 2008 la società di consulenza McKinsey ha stimato che le tecnologie attuali potrebbero ridurre il fabbisogno di energia globale del 20 per cento entro il 2020. È economicamente sensato generare energia vicino a casa. Molte comunità spendono il 10 per cento del loro denaro per i combustibili, e gran parte di questo denaro va all'Arabia Saudita o alla Exxon. Nel 2009 però l'Institute for Local Self-Reliance ha mostrato che metà degli Stati federali degli Stati Uniti potrebbero provvedere al proprio fabbisogno energetico all'interno dei propri confini, «e la grande maggioranza potrebbe provvedere a una percentuale significativa del fabbisogno». Le turbine eoliche e i pannelli solari sui tetti potrebbero fornire l'81 per cento dell'energia dello Stato di New York, e almeno un terzo di quella dell'Ohio.

L'energia locale non è un sogno romantico. Nel 2009 T. Boone Pickens ha interrotto la costruzione della più grande centrale eolica del mondo che aveva progettato nel Texas settentrionale perché le linee elettriche erano troppo costose. E ha pianificato una serie di piccole installazioni vicine alle principali città. Sulla costa orientale degli Stati Uniti i progetti per parchi eolici marini stanno andando avanti. Gli ingegneri la chiamano «generazione distribuita»: produrre energia dove serve invece di farla arrivare da grandi distanze.

Un numero sempre più alto di aziende sta installando microimpianti per edifici o campus universitari. Nel 2008 questi impianti hanno raggiunto un terzo di tutte le nuove installazioni energetiche degli Stati Uniti. All'inizio degli anni novanta a Rizhao, un'area metropolitana cinese di 3 milioni di abitanti, alcuni imprenditori hanno iniziato a montare pannelli solari idrotermici sui tetti. Ora praticamente tutte le case di Rizhao scaldano l'acqua con la luce solare.

Come per il cibo, il progresso sarebbe più rapido se il governo cancellasse i sussidi per l'industria dei combustibili fossili, e mettesse in atto incentivi come l'obbligo per i gestori di acquistare a un prezzo decente l'energia prodotta dalla generazione locale. È stato fatto in Germania, e ora il paese può vantare 1,3 milioni di pannelli fotovoltaici, più di ogni altro paese del mondo.

SUI TETTI DI RIZHAO, area metropolitana della Cina che conta 3 milioni di abitanti, sono stati installati migliaia di pannelli solari idrotermici grazie ai quali si riduce il fabbisogno di elettricità per il riscaldamento dell'acqua.

Feature China/Barcroft Media

tal Protection Agency. Ma pochi eventi nella storia dell'ambiente erano stati più importanti della pubblicazione di quel documento, tradotto in 30 lingue e venduto in 30 milioni di copie. Il gruppo di analisti aveva tratto tre conclusioni:

«1. Nell'ipotesi che l'attuale linea di sviluppo continui inalterata nei cinque settori fondamentali (popolazione, industrializzazione, inquinamento, produzione di alimenti, consumo delle risorse naturali) l'umanità è destinata a raggiungere i limiti naturali dello sviluppo entro i prossimi 100 anni. Il risultato più probabile sarà un improvviso, incontrollabile declino del livello di popolazione e del sistema industriale.

2. È possibile modificare questa linea di sviluppo e determinare una condizione di stabilità ecologica ed economica in grado di protrarsi nel futuro. La condizione di equilibrio globale potrebbe essere definita in modo che vengano soddisfatti i bisogni materiali degli abitanti della Terra e che ognuno abbia le stesse opportunità di realizzare compiutamente il proprio potenziale umano.

3. Se l'umanità opterà per questa seconda alternativa, invece che per la prima, le probabilità di successo saranno tanto maggiori quanto prima essa comincerà a operare in questa direzione» (p. 32, *I limiti dello sviluppo*, Mondadori, 1972).

Rileggendolo ora, stupisce quanto siamo andati vicino ad ascoltare il loro messaggio. In tutto il mondo si agiva per rallentare la crescita della popolazione; l'istruzione femminile era risultata la strategia migliore, e così in breve tempo si era passati da una media di oltre sei figli per donna a meno di tre. Stavamo attenti: erano gli anni delle prime crisi petrolifere, dei primi incidenti delle petroliere, le prime norme per limitare il consumo delle automobili. Accidenti, erano gli anni del limite di velocità, quando abbiamo davvero rallentato la nostra mobilità in nome della conservazione. Nei tardi anni settanta, gli statunitensi contrari alla crescita economica continua erano più numerosi di quelli a favore. Oggi ci sembra impossibile. In realtà, abbiamo avuto una momentanea opportunità di cambiare rotta, di navigare lontano dagli scogli.

E, naturalmente, non l'abbiamo fatto.

Il Club di Roma non aveva torto, come abbiamo visto. Si trovava solo prima della curva. Puoi ignorare i problemi ambientali per molto tempo, ma quando iniziano a colpirti lo fanno in modo veloce. Cresci troppo, ma poi finisci il petrolio e l'Artico si scioglie.

Mi sono dilungato su questo punto perché oggi ogni forza della nostra società è allenata a crescere sempre di più. Ma non possiamo crescere. C'è troppo attrito. Siamo su un pianeta in salita.

* * *

Però... Però c'è un'altra possibilità. Come se ci fossimo persi in un bosco, dobbiamo smettere di correre, dobbiamo fermarci, frugare nelle tasche per vedere se ce c'è qualcosa di utile e iniziare a pensare ai passi da fare.

Il primo è: maturare. Abbiamo passato due secoli aggrappati alla crescita: ci ha fatto del bene, ci ha fatto del male, ma soprattutto si è radicata in noi, mantenendoci in un'adolescenza perpetua. Ogni politico ha detto «i giorni migliori sono davanti a noi». Ma non è vero, o almeno non nel solito significato di «migliore». Su un pianeta limitato prima o poi doveva succedere. Siamo stati fortunati, la musica è finita mentre ancora eravamo in pista. Così, se il 2008 è stato l'anno in cui la crescita è terminata – o sarà il 2011, o il 2014, o il 2024 – beh, siamo arrivati. Dobbiamo accettarlo. Niente illusioni, né fantasie, né melodrammi.

Il secondo: dobbiamo decidere che cosa abbandonare. Molte abitudini, ovviamente: piccole cose come il consumismo. Ma il punto più importante della lista sta diventando sempre più evidente. La complessità è il simbolo della nostra epoca, ma quella complessità si basa su combustibili fossili economici e sul clima stabile che ha permesso un'enorme sovrabbondanza di cibo. La complessità è la nostra gloria, ma anche il nostro punto debole. Con l'aumento del prezzo del petrolio e poi con la crisi del credito nel 2008 abbiamo iniziato a capire di aver legato le cose in modo tanto stretto che piccole mancanze in un punto si riflettono su tutto il sistema. Se l'ottusa decisione degli Stati Uniti di usare parte del proprio raccolto di mais per produrre etanolo può aiutare a innescare rivolte alimentari in 37 paesi, o se una serie di miopi scommesse sui mutui nel Nevada può raddoppiare la disoccupazione in Cina, allora abbiamo permesso ai nostri sistemi di intrecciarsi in modo eccessivo. Se le nostre cattive abitudini di guida possono sciogliere la calotta polare dell'Artico... Beh, avete capito.

Abbiamo trasformato il nostro dolce pianeta: ora è la Teerra (Eaarth), e non è tanto bella. Ci stiamo rapidamente spostando da un mondo dove noi agiamo sulla natura, a uno dove la natura reagisce, e con molta più forza. Ma ancora dobbiamo vivere in quel mondo, quindi è meglio iniziare a pensare come possiamo farcela. ■

La complessità è la nostra vulnerabilità; se la decisione statunitense di usare parte del raccolto di mais per la produzione di etanolo aiuta a innescare rivolte alimentari in altri paesi, vuol dire che abbiamo permesso ai sistemi di intrecciarsi troppo

➥ Letture

I nuovi limiti dello sviluppo. La salute del pianeta nel terzo millennio. Meadows D. e altri, Mondadori, Milano, 2006.

L'economia in un mondo pieno. Daly H.E., in «Le Scienze», n. 447, novembre 2005.

Global Footprint Network: dati sul consumo delle risorse: **www.footprintnetwork.org.**

Bill McKibben alla prova: La crescita zero è davvero necessaria?

Le società si sono sempre sostenute localmente fino alla rivoluzione industriale, quando è iniziata un'inesorabile marcia verso economie più vaste e centralizzate. In *Eaarth: Making Life on a Tough New Planet*, Bill McKibben afferma che la crescita senza freni sta rovinando il pianeta; secondo McKibben le società devono cambiare rotta e conservare la ricchezza delle risorse, invece di espandersi, o scompariranno. Mark Fischetti, redattore di «Scientific American», mette alla prova le sue affermazioni.

SCIENTIFIC AMERICAN: Il suo messaggio fondamentale è che l'umanità deve abbandonare la crescita come *modus operandi*. Perché semplicemente non possiamo crescere, ma in modo intelligente?

McKIBBEN: Certo, possiamo fare le cose con maggiore efficienza, e dovremmo farlo. Ma non sarebbe sufficiente. Stiamo raggiungendo i limiti dello sviluppo di cui si parla fin dagli anni settanta, e assistiamo a incredibili cambiamenti ambientali. Solo pochi lo hanno capito.

SA: È necessaria una crescita «zero», o una crescita «molto limitata» potrebbe essere sostenibile?

McKIBBEN: Non sono un utopista. Non ho uno schema preciso sull'esatto punto dove si dovrebbe fermare il pianeta. L'analisi non contiene una cifra precisa. Sono più interessato alle traiettorie: che cosa succede se rinunciamo all'idea secondo cui la crescita è la risposta a tutto e andiamo in un'altra direzione? Siamo stati assorbiti dall'esperimento della crescita e abbiamo quasi ignorato altre possibilità. Possiamo misurare la società in altri termini. Alcuni paesi misurano la soddisfazione. Se misurassimo il mondo in altri modi, l'accumulazione della ricchezza diventerebbe meno importante.

SA: Il sottinteso è che i grandi sistemi monolitici e centralizzati per agricoltura, energia e altri commerci guidano la crescita. Sta dicendo che «grande» è «male»?

McKIBBEN: Abbiamo costruito grandi strutture perché permettevano una crescita più rapida. Il rendimento era ottenuto grazie alla dimensione. Non è più ciò di cui abbiamo bisogno. Non abbiamo bisogno di un cavallo da corsa pensato per andare il più veloce possibile ma con caviglie fragili che si rompono quando trova una buca. Abbiamo bisogno di un cavallo da tiro, allenato alla lunga durata. La lunga durata deve essere il nostro *mantra*, non l'espansione.

SA: Il problema è semplicemente la grande dimensione, o è la complessità che si porta dietro? Lei sostiene che non sono solo le banche a essere «troppo grandi per fallire», ma anche altre industrie più fondamentali. Dobbiamo smantellare queste istituzioni, o almeno semplificarle in qualche modo?

McKIBBEN: Il sistema finanziario, quello dell'energia e quello dell'agricoltura hanno alcune caratteristiche simili: pochi attori, estremamente interconnessi. In questi scenari, quando c'è un problema gli effetti si propagano a cascata. Un alimento che contiene botulino diffonde questa tossina in diversi luoghi. A casa mia ho i pannelli solari. Se non funzionano, io ho un problema, ma non blocca tutta la rete elettrica degli Stati Uniti orientali.

SA: Quindi invoca un ritorno alla produzione locale. Ma già dal 1973, quando fu pubblicato *Piccolo è bello*, il libro di Ernst Friedrich Schumacher, in molti sono impegnati a creare sistemi locali di cibo ed energia in tutto il mondo. Molte regioni però ancora non ce la fanno. Quanto è piccolo il «locale»?

McKIBBEN: Troveremo la dimensione giusta. Potrebbe essere una città, una regione, uno Stato. Ma per trovare la risposta dobbiamo eliminare dal sistema l'enorme distorsione dei sussidi, che mandano tutti i segnali negativi possibili rispetto a quanto dovremmo fare. In campo energetico, per lungo tempo abbiamo finanziato i combustibili fossili, e abbiamo finanziato in modo ancora più evidente l'agricoltura. Una volta eliminati i sussidi, potremo capire qual è la dimensione giusta per l'industria.

Jen Christiansen

Cortesia Brett Foreman

BILL McKIBBEN all'incontro organizzato dal suo gruppo 350.org a Times Square, New York, il 24 ottobre 2009 in occasione della Giornata mondiale di azione per il clima, uno dei 5200 eventi organizzati in 181 paesi da 350.org.

SA: I prodotti locali costano di più?

McKIBBEN: Avremmo più fattorie, con maggiore intensità di lavoro, ma questo creerebbe un maggior numero di posti di lavoro, e l'agricoltore guadagnerebbe di più. Dal punto di vista economico l'agricoltura locale elimina molti mediatori. Comprare verdure da fattorie sostenute dalla comunità è il modo più economico per ottenere cibo. Il prezzo della carne potrebbe rimanere elevato, ma francamente mangiare meno carne non è la fine del mondo. La migliore notizia che c'è nel mio libro è un fenomeno avvenuto negli ultimi anni nei paesi in via di sviluppo: la diffusione di ogni tipo di metodo intelligente e ben studiato dal punto di vista tecnologico per l'agricoltura a piccola scala.

SA: Sembra che la chiave per l'agricoltura locale sia insegnare ad aumentare le rese senza usare più fertilizzanti.

McKIBBEN: Sì, e dipende da dove ci si trova. Non ci sarà un unico sistema per tutto il mondo, come invece è stato per l'agricoltura industriale basata sui fertilizzanti sintetici. Le soluzioni sono molto più intelligenti. Invece di usare la chimica sintetica, che causa ogni tipo di problemi, stiamo studiando metodi alternativi e il modo di diffonderli.

SA: Va bene, ma anche se l'agricoltura locale funziona, come fa a sostenere la sostenibilità invece della crescita?

McKIBBEN: Probabilmente il bene più importante per la stabilità a lungo termine, soprattutto in un'epoca di mutamenti ecologici, è un terreno che permette di coltivare una buona quantità di cibo, che può assorbire molta acqua perché le precipitazioni sono in costante aumento, che trattiene l'acqua nei lunghi periodi di siccità, sempre più comuni. L'agricoltura locale, che ha basso impatto e necessita di una quantità minore di integratori, porta a un buon terreno. Ed è questo tipo di terreno a essere distrutto dall'agricoltura industriale.

SA: Sfruttare il locale sembra affascinante, ma senza crescita come sarà possibile risolvere la questione del debito pubblico? Il Department of the Treasury degli Stati Uniti sostiene che l'unica soluzione indolore sia la crescita. Abbiamo bisogno di un periodo di transizione in cui la crescita elimina il debito per poi dedicarci alla lunga durata?

McKIBBEN: Beh, «indolore» è solo un modo per rinviare. «Pagami ora, o pagami dopo». La questione politica principale è: possiamo cambiare in modo abbastanza veloce da evitare collassi totali considerati possibili, e perfino probabili? Come possiamo accelerare queste transizioni?

SA: Qual è la mossa più importante da fare subito?

McKIBBEN: Cambiare il prezzo dell'energia in modo che rifletta i danni che causa all'ambiente. Se i combustibili fossili avessero un prezzo che tiene conto del loro costo ambientale, il cambiamento sarebbe molto più rapido. Una tassa che aumenti il prezzo dell'energia è una condizione indispensabile per ottenere qualunque cosa.

SA: Difficile da ottenere...

McKIBBEN: Non c'è una soluzione facile ai problemi che abbiamo. Ma il mondo che possiamo creare ha le qualità necessarie per cambiare rotta, tra cui più senso di comunità e più empatia tra persone e mondo naturale. Per molto tempo abbiamo barattato la comunità per il consumo. Dalla fine della seconda guerra mondiale gli Stati Uniti si sono concentrati sulla costruzione di case più grandi, lontane tra loro. Questo ha distrutto la comunità. Lo statunitense medio ha metà degli amici che aveva cinquant'anni fa. Non stupisce che siamo meno contenti delle nostre vite, anche se è cresciuto il tenore di vita materiale. Questo fa immaginare il cambiamento di cui abbiamo bisogno. Abbandonare la crescita per la sostenibilità porterà a perdite, ma anche a guadagni.

Le vere lacune dei modelli climatici

Come qualsiasi altro campo della scienza, anche lo studio del cambiamento climatico presenta problemi e lacune, che però non mettono in discussione l'origine antropica dell'attuale riscaldamento del pianeta

di Quirin Schiermeier

IN SINTESI

- Nel suo ultimo rapporto, pubblicato nel 2007, l'Intergovernmental Panel on Climate Change ha indicato 54 incertezze fondamentali in materia di clima.
- In questo articolo l'autore analizza i quattro principali problemi che attualmente non permettono ai modelli climatici di fare previsioni precise a livello locale, oppure di ricostruire il clima del lontano passato con estrema accuratezza.
- Tuttavia, i punti di criticità della climatologia non mettono in dubbio il fatto che il riscaldamento attuale del pianeta sia dovuto ad attività umane, come invece sostengono gli scettici del cambiamento climatico.

Le e-mail trapelate lo scorso novembre dalla Climatic Research Unit (CRU) dell'Università dell'East Anglia, nel Regno Unito, sono state un inatteso regalo di Natale per i negazionisti del cambiamento climatico. Tra gli oltre 1000 messaggi si trovavano infatti vari commenti che, se estrapolati dal contesto, potevano far pensare che i climatologi abbiano nascosto all'opinione pubblica molte informazioni.

Una lettura più attenta di quelle e-mail mostra in realtà un discreto livello di volgarità e di linguaggio inappropriato, ma niente che possa minare l'opinione esistente nel mondo scientifico riguardo il cambiamento climatico. Il piccolo incidente, tuttavia, offre l'opportunità di evidenziare il fatto che, come in molti altri settori della ricerca, anche nella climatologia ci sono importanti lacune. L'ultimo rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), pubblicato nel 2007, ha messo in risalto 54 «incertezze fondamentali» che affliggono lo studio del clima.

Una simile autodenuncia non può certo definirsi «nascosta», e alcuni dei punti messi in luce, come l'incerta attendibilità delle misurazioni delle temperature del passato, sono stati ampiamente discussi sui media. Altre lacune, invece, sono note quasi esclusivamente agli specialisti del settore. Esse, in ogni caso, non mettono in discussione l'idea fondamentale che il cambiamento climatico sia dovuto all'uomo: questa idea è basata sulle variazioni estremamente rapide che la temperatura ha fatto registrare nel corso del XX secolo e sull'impossibilità per i modelli climatici di simulare un simile riscaldamento senza tenere conto dell'inquinamento da gas serra. Queste incertezze rischiano tuttavia di trasformarsi in un serio ostacolo per la pianificazione del nostro futuro e, al contrario dei soliti miti citati dai negazionisti (*si veda il box a p. 64*), alcune di esse potrebbero risultare in variazioni climatiche persino peggiori di quanto previsto finora.

Secondo i ricercatori è difficile parlare apertamente di queste lacune. «È ovvio che ci siano aspetti del sistema climatico della Terra e delle sue componenti che ancora conosciamo poco, ed è anche vero che di questo il pubblico non è sempre stato informato adeguatamente», dice Gavin Schmidt, esperto di modelli climatici della NASA presso il Goddard Institute for Space Studies di New York nonché moderatore e redattore di «Real Climate», uno dei blog più influenti sull'argomento. «Ma il clima di sospetto in cui lavoriamo è ormai insostenibile. Ogni pretesto è buono per gridare alla "frode" e al "comportamento scorretto", ed è diventato molto difficile discutere in maniera razionale dei problemi della nostra scienza».

«Nature» ha evidenziato in particolare quattro aree (previsioni climatiche regionali, previsioni sulle precipitazioni, aerosol e dati paleoclimatici) che, secondo molti, meriterebbero una discussione più approfondita, sia all'interno degli ambienti scientifici sia in ambito pubblico.

Previsioni climatiche regionali

Purtroppo è vero che nello studio del clima le informazioni più cruciali sono anche le meno attendibili. Per pianificare il proprio futuro, le popolazioni vogliono sapere in che modo cambieranno le condizioni nella propria regione, non di quanto salirà la temperatura globale. I ricercatori, però, non hanno ancora sviluppato strumenti in grado di prevedere con precisione quali cambiamenti avverranno nel XXI secolo su scala locale e regionale.

Gli strumenti usati per simulare il clima terrestre sono i modelli a circolazione generale (GCM, *general circulation model*), che rappresentano i processi fisici in atto nell'atmosfera, negli oceani, sui ghiacciai continentali e sulla terraferma. Questi modelli hanno in genere una risoluzione di circa 1-3 gradi sia in latitudine che in longitudine: troppo poco per fornire informazioni utili a livello locale. I climatologi simulano quindi i cambiamenti regionali «zoomando» sui modelli globali. Usano cioè le stesse equazioni, ma le risolvono per un numero molto più grande di punti della griglia su una particolare area.

Aumentare la risoluzione in questo modo, però, può dare dei problemi. Zoomando su un modello GCM si rischia infatti di ingigantire anche le debolezze intrinseche del modello di partenza. Se il modello simula in modo non corretto certe variazioni atmosferiche, quello stesso errore verrà amplificato a livello regionale. In genere, quindi, gli esperti sono molto cauti quando sono in gioco previsioni specifiche. «Per la maggior parte dei paesi – conferma Leonard Smith, statistico e climatologo della London School of Economics and Political Science – l'attuale risoluzione dei modelli climatici non è sufficiente per un impiego pratico».

«È meglio prendere le previsioni a livello regionale con molta cautela», ribadisce Hans von Storch, esperto di modelli climatici dell'Istituto per le ricerche sugli ambienti costieri del GKSS Research Center di Geesthacht, in Germania, che ha recentemente contribuito allo studio climatico dell'area metropolitana di Amburgo. Secondo von Storch, se le simulazioni prevedono cambiamenti che sono in linea con le tendenze già osservate, allora ci si può fidare. Se invece il modello, o i modelli, danno risultati divergenti e non in linea con le tendenze in corso, «allora è il caso di prendere i risultati con molta cautela. Se possibile, prima di fare grossi investimenti a livello di pianificazio-

Regis Duvignau/Reuters/Contrasto

Jen Christiansen (*grafica*)

UNO DEI PRINCIPALI PROBLEMI dei modelli climatici è la scarsa affidabilità delle previsioni a scala regionale. In ogni caso singoli eventi meteorologici, come la violenta perturbazione atlantica abbattutasi sulla Francia alla fine di febbraio, non possono essere attribuiti al cambiamento climatico.

ne territoriale, sarebbe meglio aspettare previsioni più attendibili».

Il *downscaling* dei modelli climatici, ossia il loro impiego su scala ridotta, è particolarmente problematico quando si opera su aree con una topografia complessa, per esempio dove una catena montuosa separa due pianure con climi differenti. Un'altra potenziale fonte di errori è rappresentata dall'incognita sulle emissioni di gas serra, che potranno variare a seconda dello sviluppo economico che si raggiungerà effettivamente.

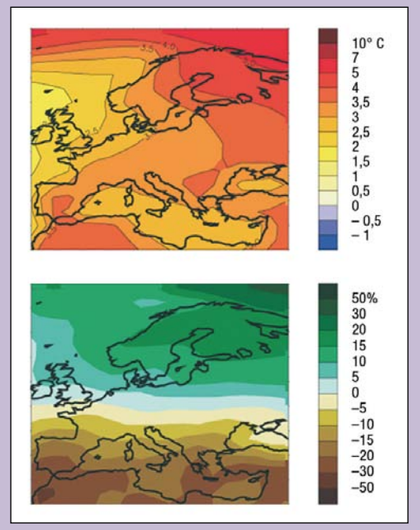
Nonostante questi problemi, e a patto che vengano tenute presenti le relative limitazioni, le simulazioni regionali continuano comunque ad avere una loro utilità. Già oggi in molti casi sono usate nella pianificazione territoriale, sia a livello locale che nazionale (*si vedano i grafici qui a fianco*). Inoltre, secondo Jonathan Overpeck, climatologo dell'Università dell'Arizona a Tucson, rimangono un importante strumento per capire alcuni processi, come la variazione della portata dei fiumi, che con i modelli globali è impossibile studiare. Overpeck fa parte di un gruppo di ricerca che sta impiegando metodi statistici per risolvere le divergenze tra le previsioni fornite dai vari modelli sulla riduzione della portata media del fiume Colorado da qui al 2050. I ricercatori sperano che, migliorando la simulazione di variabili climatiche come la copertura nuvolosa e la temperatura superficiale del mare, sarà possibile ridurre ulteriormente il margine di incertezza delle previsioni regionali, rendendole uno strumento più utile per le scelte di pianificazione territoriale.

Le precipitazioni

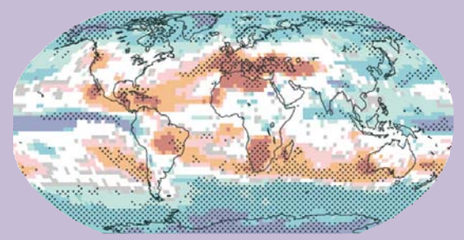
Nei prossimi decenni l'aumento delle temperature globali causerà probabilmente un incremento dell'evaporazione e accelererà il ciclo idrologico globale, provocando una riduzione delle piogge nelle aree subtropicali e un aumento delle precipitazioni alle latitudini maggiori. In realtà queste tendenze sono già in atto oggi, e quasi tutti i modelli climatici impiegati per simulare il riscaldamento globale prevedono una loro crescita in futuro.

Sfortunatamente, per quanto riguarda le precipitazioni questo è tutto ciò su cui i modelli concordano. Le numerose simulazioni condotte dall'IPCC per la stesura del rapporto del 2007 hanno infatti prodotto scenari diversi in questo ambito (*si veda l'immagine a destra*). La situazione è particolarmente complessa per le precipitazioni invernali, considerate in genere le più importanti per la ricostituzione delle riserve idriche. Le simulazioni dell'IPCC non sono riuscite a fornire un quadro definitivo di come queste precipitazioni potranno

SECONDO I MODELLI CLIMATICI, alla fine di questo secolo le temperature in Europa (*in alto*) saliranno di oltre tre gradi rispetto alla fine del XX secolo. Per le precipitazioni (*in basso*) si prevede un clima più secco nell'Europa meridionale e condizioni più umide in Europa settentrionale.



VARIAZIONI DELLE PRECIPITAZIONI previste per il decennio 2090-2099. Il blu indica un aumento delle precipitazioni, il marrone indica una diminuzione. Il bianco rappresenta le zone di incertezza, dove meno di due terzi dei modelli concordano sulla previsione. Nelle aree punteggiate, invece, il 90 per cento dei modelli concorda sulla previsione.



Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC, 2007 (*grafici*)

variare alla fine del XXI secolo su gran parte delle terre emerse.

Ancora più preoccupante è il fatto che già oggi i modelli sembrano sottostimare il calo delle precipitazioni verificatosi nell'ultimo periodo, riducendo ulteriormente il loro grado di affidabilità nel prevedere cambiamenti futuri. Uno studio pubblicato nel 2007, troppo tardi per essere inserito nell'ultimo rapporto IPCC, ha dimostrato che le variazioni delle precipitazioni verificatesi nel XX secolo sono dovute in maniera evidente all'azione umana. Il riferimento, in particolare, è al calo delle precipitazioni registrato nella fascia tropicale e subtropicale dell'emisfero nord. Le variazioni reali sono risultate più cospicue rispetto a quanto prevedevano i modelli, e questo preoccupa i ricercatori.

Secondo Gabriele Hegerl, esperta di sistemi climatici dell'Università di Edimburgo e coautrice dello studio, «se i modelli sottostimano sistematicamente la variazione delle precipitazioni, allora siamo nei guai», perché già con le attuali previsioni si prospetta un sostanziale peggioramento delle condizioni. «Si tratta di un'incertezza piuttosto significativa», commenta.

Jurgen Mols/Corbis (*siccità*)

I climatologi pensano che una delle principali debolezze dei loro modelli risieda nella scarsa capacità di simulare i movimenti verticali dell'aria, quali per esempio i movimenti convettivi che ai tropici sollevano l'aria umida nell'atmosfera. Per questo stesso motivo, i modelli possono essere in errore quando effettuano calcoli nelle vicinanze di catene montuose particolarmente scoscese. Un altro fattore che può condurre a previsioni sbagliate è la scarsa comprensione da parte degli scienziati dell'effetto che le particelle di aerosol, di origine sia naturale che antropica, hanno sulle nubi. I dati relativi alla distribuzione delle precipitazioni nel passato potrebbero contribuire a risolvere alcuni di questi problemi, ma in molte zone misurazioni di questo tipo non sono disponibili. «In realtà – ammette Hegerl – non conosciamo molto bene la variabilità naturale, soprattutto ai tropici».

L'incertezza legata al futuro delle precipitazioni rende difficoltosa la pianificazione, soprattutto in regioni aride come il Sahel e il sudovest del continente nordamericano. Lunghi periodi di siccità, anche di svariati decenni, hanno già colpito queste regioni nel passato e si prevede che lo faranno ancora in futuro. I modelli che vengono usati oggi non riescono però a simulare adeguatamente siccità così lunghe. «C'è di che preoccuparsi», commenta Overpeck.

«Il clima di sospetto in cui lavoriamo è insostenibile, e rende sempre più difficile discutere in maniera razionale i problemi della climatologia.»

Gavin Schmidt

Aumentare la risoluzione dei modelli non sarà però sufficiente per simulare correttamente i processi convettivi che sono alla base delle precipitazioni. Per riuscire a fornire previsioni più precise, i ricercatori stanno quindi provando altre opzioni, come migliorare le simulazioni della formazione e della dinamica delle nubi, due variabili climatiche cruciali. In aggiunta, grazie alla sempre maggiore diffusione dei dati ad alta risoluzione forniti dai satelliti, sta diventando più facile verificare e migliorare il realismo dei modelli.

Il dilemma degli aerosol

Gli aerosol atmosferici (particelle liquide o solide sospese nell'aria) sono alla base di molti dubbi della climatologia. Nonostante decenni di intense ricerche, infatti, gli scienziati hanno ancora enormi margini di incertezza quando studiano l'effetto sulla temperatura e sulle precipitazioni di particelle come i solfati, il particolato carbonioso, il sale marino e la polvere.

L'opinione generale è che gli aerosol raffreddino il clima, bloccando la luce solare. Le stime esatte di questo fenomeno variano però tra loro di un ordine di grandezza, e secondo quelle più pessimistiche il potere riscaldante degli aerosol sarebbe addirittura superiore a quello di tutta l'anidride carbonica immessa nell'atmosfera dagli esseri umani. Uno dei problemi più seri è la scarsità di dati. «Non sappiamo che cosa c'è nell'atmosfera – ammette Schmidt – per cui abbiamo ancora grandi incertezze su alcuni processi climatici fondamentali, sia per il passato che per il futuro».

Per misurare gli aerosol presenti nel cielo ci sono sensori satellitari e terrestri che rilevano la diffusione e l'assorbimento della radiazione solare. Questi dati, tuttavia, non sono sufficienti per disegnare un quadro globale. Inoltre, per determinare in che modo gli aerosol influenzino i processi climatici sarà necessario effettuare una complessa serie di esperimenti coordinati.

Alcuni aerosol, come il particolato carbonioso, assorbono la luce solare, e producono un effetto riscaldante che può anche inibire le precipitazioni. Altre particelle, come i solfati, riflettono la luce, producendo un effetto refrigerante. Perciò l'effetto complessivo dell'inquinamento da aerosol sulla temperatura globale non è chiaro, e gli studi condotti non hanno neppure specificato se questo tipo di inquinamento sia in aumento o in diminuzione.

Miti climatici duri a morire

Mentre i climatologi si scontrano con incertezze concrete, coloro che dubitano che il riscaldamento climatico dipenda dall'uomo generalmente ignorano gli argomenti seri e ricorrono a obiezioni che sono già state ampiamente confutate. Ecco alcuni miti sul clima che ancora resistono:

■ I modelli climatici non sono in grado di dare informazioni utili sul mondo reale
I modelli possono riprodurre gran parte delle variazioni climatiche avvenute nell'ultimo millennio, ma le previsioni per il futuro sono soggette a incertezze ben note, riguardanti sia l'andamento del clima che lo sviluppo economico. I modelli non possono quindi fornire informazioni esatte sull'entità dei cambiamenti che avverranno, però possono dare informazioni di tipo generale. E la loro previsione è che la Terra continuerà a scaldarsi.

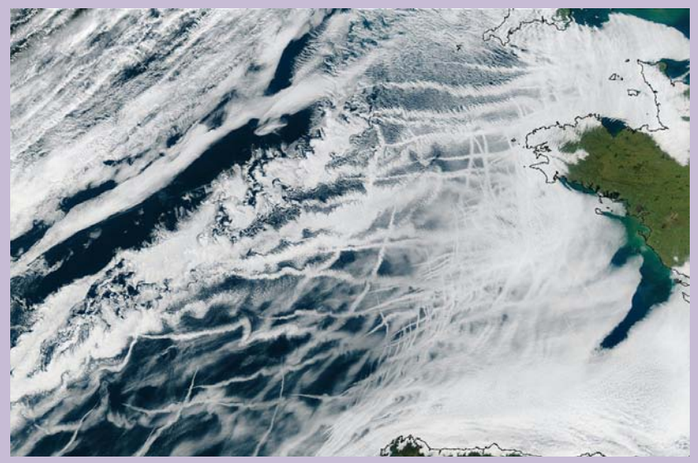
■ Il riscaldamento globale si è arrestato dieci anni fa
Il clima non è il tempo meteorologico. Il clima è la media su molti decenni dei cambiamenti che costantemente avvengono nell'atmosfera, mentre la temperatura può variare di anno in anno o di decennio in decennio per oscillazioni naturali. Sebbene nell'ultimo decennio le temperature globali non siano salite quanto nei decenni precedenti, questo è stato comunque il decennio più caldo in assoluto.

■ Le temperature erano più alte in epoca preindustriale
In base alla ricostruzione del clima preindustriale eseguita con i dati indiretti, la seconda metà del XX secolo è stata probabilmente il mezzo secolo più caldo degli ultimi mille anni. In tempi ancora più remoti ci sono stati periodi più caldi, ma le condizioni orbitali e geologiche erano diverse. In ogni caso, la scoperta di periodi caldi nel passato non dimostra che l'attuale riscaldamento non sia dovuto all'uomo. Le cause di ciascun riscaldamento devono essere studiate separatamente.

■ Se si considerano le temperature registrate negli strati più bassi dell'atmosfera, il pianeta non si sta riscaldando
Dieci anni fa sembrava esserci una discrepanza tra le temperature sulla superficie e quelle della troposfera. Poi sono stati risolti alcuni problemi di calibrazione dei sensori satellitari e oggi le misurazioni satellitari mostrano che anche l'atmosfera inferiore si sta scaldando alla velocità prevista dai modelli climatici.

■ Qualche grado in più di temperatura non è un grosso problema
Durante l'ultima era glaciale il pianeta era in media solo pochi gradi più freddo di oggi. La velocità dell'attuale riscaldamento è quasi sicuramente unica nella storia dell'umanità. Inoltre, è vero che probabilmente non esiste una temperatura «ottimale» per il pianeta, ma le società umane moderne si sono adattate al clima e ai livelli del mare degli ultimi millenni. La rapidità del riscaldamento globale potrebbe quindi costituire un grosso problema.

■ L'aumento delle temperature è dovuto, più che al riscaldamento globale, alla crescita delle città vicino alle stazioni meteorologiche
I climatologi hanno lavorato a lungo per escludere l'effetto dell'urbanizzazione sui dati climatici, confrontando i dati delle stazioni meteo vicine alle città con le registrazioni delle centraline rurali. Inoltre, alcune delle anomalie più grandi si sono registrate nelle aree meno popolate del pianeta, per esempio nell'Artico e nella penisola antartica. Le misurazioni mostrano inoltre un riscaldamento degli oceani, sia in superficie che in profondità.

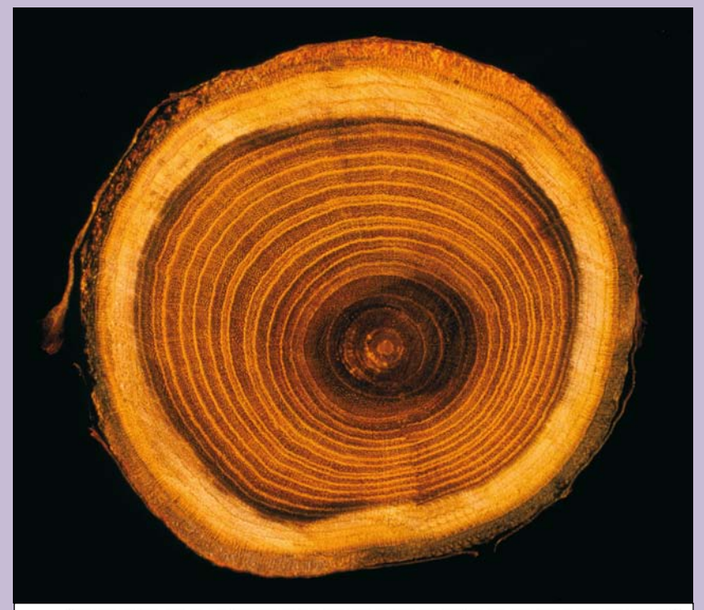


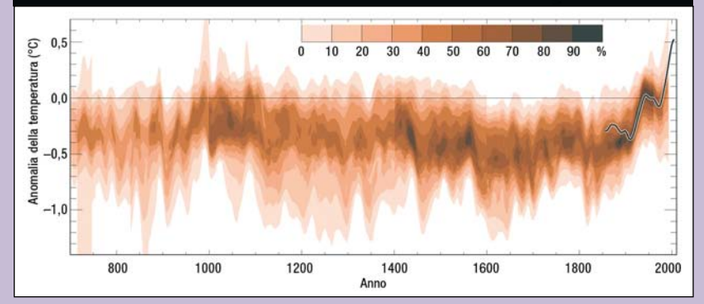
SOTTILI LINEE BIANCHE sull'Oceano Atlantico mostrano come gli aerosol prodotti dagli scarichi delle navi rendano più luminose le nubi. L'effetto degli aerosol sul clima non è ancora del tutto chiaro.

J. Desloitres/MODIS Response Team/GSFC/NASA

L'interazione tra gli aerosol e le nubi aggiunge poi un ulteriore livello di complessità. Prima che una nube possa produrre pioggia o neve, infatti, si devono formare gocce d'acqua o particelle di ghiaccio che facciano da nuclei di condensazione. Tuttavia, mentre alcuni aerosol sembrano favorire la nuvolosità, altri sembrano ridurla. Inoltre gli aerosol alterano la formazione e la durata delle nubi di bassa quota, che riflettono la luce solare e mantengono fresca la superficie del pianeta. Una loro variazione potrebbe quindi avere importanti conseguenze sulle temperature.

Gli scienziati devono ancora decifrare del tutto le interazioni esistenti tra inquinamento, nubi, precipitazioni e temperatura. A questo scopo la NASA ha previsto per il prossimo ottobre il lancio del satellite Glory, che si occuperà di monitorare gli aerosol e l'irraggiamento solare, fornendo dati che si riveleranno molto utili. Tuttavia, come ricordano i ricercatori, anche i sensori installati a terra sono importanti, perché consentono di determinare l'abbondanza e la composizione degli aerosol nell'atmosfera.





STIME DELLA TEMPERATURA dell'emisfero nord basate sui dati ricavati dagli anelli di crescita degli alberi e da altre fonti (calcolate relativamente alla media del periodo 1969-1990). La curva confronta dieci studi; un colore più scuro significa maggiore accordo tra essi. C'è discordanza riguardo le condizioni intorno al 1000 d.C.: secondo molti studi le temperature erano notevolmente più basse di oggi, mentre per altri ci fu un riscaldamento paragonabile a quello del XX secolo. A partire dal 1900, il consenso sul riscaldamento è molto maggiore. La linea nera spessa indica la temperatura registrata dai termometri.

Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC, 2007 (*grafico*); Sheila Terry/SPL/Contrasto (*anelli di crescita*)

La controversia degli anelli

Molte delle e-mail trafugate dai computer della CRU provenivano da un gruppo di ricercatori il cui lavoro è ricostruire le variazioni della temperatura nel passato. I messaggi rivelavano alcune loro incertezze riguardo alle informazioni ricavate dagli anelli di crescita degli alberi e da altri fonti indirette (*proxy data*).

Le misurazioni termometriche riguardano solo gli ultimi 150 anni, e mostrano, per i decenni più recenti, un deciso aumento delle temperature che non può essere spiegato attraverso cause esclusivamente naturali e che è molto probabilmente dovuto ai gas serra prodotti dall'uomo. Prima del 1850 invece le misurazioni attendibili sono poche, e i ricercatori devono ricorrere ad altri sistemi per ricostruire l'andamento della temperatura nelle epoche remote.

Nasce così la paleoclimatologia, che studia fonti come gli anelli di crescita degli alberi, le barriere coralline, i sedimenti lacustri, le stalagmiti, i movimenti dei ghiacciai e i resoconti storici. Durante la crescita degli alberi, per esempio, si sviluppano anelli annuali il cui spessore dipende dalla temperatura e dalle precipitazioni. Quasi tutte le informazioni di cui disponiamo sulle fluttuazioni climatiche del passato provengono da indicatori indiretti di questo tipo. Grazie a essi è stato possibile individuare il periodo caldo medievale, durato dall'800 al 1300 circa, e la piccola era glaciale, verificatasi intorno al 1700.

Se si mettono insieme i dati indiretti riguardanti le temperature dell'emisfero nord, si ottiene un grafico che assomiglia a una mazza da hockey, con una crescita sostanziale rispetto alla media nel lungo periodo proprio in corrispondenza della fine del XX secolo. A iniziare questo tipo di lavoro fu, nel 1998, Michael Mann, climatologo dell'Università della Virginia a Charlottesville. In una pubblicazione successiva, il suo gruppo concluse che il decennio degli anni novanta è stato probabilmente il più caldo degli ultimi mille anni e che il 1998 è stato l'anno più caldo in assoluto. Il suo lavoro figurava tra gli studi principali del rapporto 2001 dell'IPCC.

L'uso di dati indiretti ha però dato l'avvio a un'accesa discussione. Uno dei maggiori critici, Stephen McIntyre, un canadese ex consulente minerario e redattore del blog «Climate Audit», ha passato gli ultimi dieci anni a dimostrare l'infondatezza del lavoro di Mann e di altri scienziati coinvolti nella vicenda delle e-mail. McIntyre ha attaccato furiosamente l'uso dei dati indiretti, e in particolare i metodi statistici usati per analizzare i dati estrapolati dagli anelli di crescita. Molti scienziati si sono però stancati delle critiche, e l'IPCC ha messo fine alla diatriba dicendo che la seconda metà del XX secolo è stata «probabilmente» il cinquantennio più caldo degli ultimi 1300 anni nell'emisfero nord, e che sui dati paleoclimatici rimangono ancora diversi dubbi.

In particolare, i climatologi sono preoccupati per i dati dedotti dagli alberi di alcune regioni delle latitudini elevate. Confrontando questi dati con le temperature misurate nelle zone circostanti, i ricercatori hanno infatti scoperto che la crescita degli alberi ha seguito l'andamento delle temperature atmosferiche per quasi tutto il XX secolo, ma poi se ne è discostata negli ultimi decenni. Il fatto potrebbe essere spiegato ammettendo che quando le temperature superano una certa soglia la cre-

ALCUNI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO sono già visibili, come nel caso di questa casa di Shishmaref, in Alaska. L'abitazione è franata a causa dello scioglimento del permafrost su cui era costruita, dovuto all'aumento della temperatura registrato negli ultimi trent'anni.

AFP/Getty Images

scita risponde in maniera differente. Riferimenti a questa «divergenza» sono contenuti anche nelle e-mail della CRU. Nel più citato di quei messaggi l'ex direttore del centro Phil Jones parla di un «trucco» (sostituire le temperature ricavate dagli alberi con le temperature reali per l'ultima parte del XX secolo) per nascondere il calo nella risposta degli alberi rispetto all'aumento delle temperature.

A prima vista le parole di Jones sembrano condannarlo in maniera inequivocabile, e in effetti in un grafico delle temperature dell'emisfero nord prodotto per la World Meteorological Organization nel 2000 non veniva specificato che, per correggere la divergenza riscontrata negli ultimi mille anni, alcuni dati indiretti erano stati sostituiti con i dati strumentali. Nell'immagine erano però presenti e ben visibili i riferimenti ad articoli che discutevano la questione.

«Mostravano quelle che erano, all'epoca, le migliori stime sull'evoluzione delle temperature», dice Hegerl. «Tuttavia, con il senno di poi, avrebbero potuto essere un po' più chiari sul procedimento seguito, considerata anche l'importanza di queste cifre».

Secondo Thomas Stocker, co-presidente del gruppo di lavoro dell'IPCC che si occupa delle basi scientifiche del cambiamento climatico, la decisione di escludere i dati dendroclimatici che divergono da quelli strumentali ha senso. Il problema della divergenza riguarda infatti solo alcuni punti specifici all'interno di poche regioni situate a latitudini elevate nell'emisfero nord.

Nonostante questo, il problema della divergenza continua a essere oggetto di dibattito nella comunità scientifica. «Sono preoccupato dalle possibili cause della divergenza», dice Hegerl. «Finché non scopriamo perché quelle fonti divergono, non possiamo essere certi che esse rappresentino il passato in maniera attendibile». Per migliorare l'utilità delle fonti indirette sarà perciò necessario studiare meglio la crescita delle diverse specie di alberi e la loro reazione ai cambiamenti climatici.

Un altro problema relativo all'uso dei dati indiretti è la sostanziale incertezza sulle temperature prima del 1500. Secondo alcuni studi pubblicati nel 2004 e nel 2005, basati su una combinazione di fonti indirette di diversa risoluzione, le fluttuazioni della temperatura globale durante il passato millennio potrebbero essere state più ampie di quanto ipotizzato inizialmente. Anche in questi studi, comunque, le temperature registrate nella seconda metà del XX secolo risultano essere le più alte, precisa von Storch, e quelle relative all'ultimo decennio del Novecento sono le più alte in assoluto.

Secondo Susan Solomon, climatologa della National Oceanic and Atmospheric Administration a Boulder, in Colorado, ed ex co-presidente del gruppo IPCC che ha prodotto il rapporto 2007 sulle basi scientifiche, nonostante i dubbi riguardanti i dati indiretti l'affermazione di base dell'IPCC (che la maggior parte del riscaldamento verificatosi nella seconda metà del XX secolo è «molto probabilmente» dovuta all'aumento dei gas serra prodotti dall'uomo) rimane in piedi, perché poggia su molteplici elementi di prova forniti da diversi gruppi di ricerca che hanno esaminato svariati aspetti del sistema climatico.

«Gli scienziati dell'IPCC – dice –non avrebbero mai sostenuto l'inequivocabilità del riscaldamento basandosi su un solo elemento di prova. Neanche se fosse stato Mosè in persona a fornirglielo». ■

Tradotto per gentile concessione di Macmillan Publishers Ltd., © «Nature», 2010.

Letture

IPCC Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2007.

Detection of Human Influence on Twentieth-Century Precipitation Trends. Zhang X. e altri, in «Nature», Vol. 448, pp. 461-465, 2007.

Highly Variable Northern Hemisphere Temperatures Reconstructed from Low- and High-Resolution Proxy Data. Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M. e Karlén W., in «Nature», Vol. 433, pp. 613-617, 2005.

Reconstructing Past Climate from Noisy Data. Von Storch H. e altri, in «Science», Vol. 306, pp. 679-682, 2004.

Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. Mann M.E., Bradley R.S. e Hughes M.K., in «Geophysical Research Letters», Vol. 26, pp. 759-762, 1999.

Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing Over the Past Six Centuries. Mann M.E., Bradley R.S. e Hughes M.K., in «Nature», Vol. 392, pp. 779-787, 1998.

La **Nuda** Verità

Recenti scoperte stanno gettando nuova luce sulle origini dell'assenza di peli nella nostra specie, suggerendo che la pelle nuda fu un fattore cruciale per l'apparizione di altre caratteristiche umane

di Nina G. Jablonski

Gli esseri umani sono gli unici primati ad avere la pelle quasi del tutto spoglia. Come la maggior parte dei mammiferi, tutti gli altri membri della nostra famiglia allargata hanno una densa copertura di pelliccia, dal pelo nero e corto della scimmia urlatrice al fluente manto ramato dell'orango. Noi abbiamo peli sulla testa e in altre parti del corpo, ma a confronto con i nostri parenti anche il più peloso di noi è sostanzialmente nudo.

Come abbiamo fatto a denudarci fino a questo punto? La domanda è ponderata da secoli, ma trovare risposte è stato difficile: la maggior parte delle transizioni fondamentali dell'evoluzione umana, come l'emergere della postura eretta, è registrata nei fossili dei nostri progenitori, ma nessuno dei reperti conosciuti ha conservato impronte della pelle. Recentemente però ci si è resi conto che i documenti fossili contengono in realtà indizi indiretti sulla nostra trasformazione da irsuti a glabri. Grazie a queste tracce e alle informazioni raccolte nell'ultimo decennio dalla genomica e dalla fisiologia, io e altri ricercatori siamo riusciti a mettere insieme una ricostruzione convincente del quando e del perché gli esseri umani hanno perso il pelo. Oltre a spiegare un dettaglio molto particolare della nostra origine, il nostro scenario sembra suggerire che la pelle nuda abbia poi avuto un ruolo cruciale nell'evoluzione di altri tratti tipicamente umani, tra cui il nostro grande cervello e la dipendenza dal linguaggio.

Situazioni pelose

Per capire perché i nostri antenati hanno perso il pelo dobbiamo anzitutto considerare la ragione per cui altre specie hanno la pelliccia.

Il pelo è un tipo di copertura corporea esclusivo dei mammiferi. Anzi, è uno dei caratteri che definiscono questa classe: tutti i mammiferi hanno almeno qualche pelo, e gran parte di essi ne ha in abbondanza. Il pelo offre isolamento e protezione contro le abrasioni, l'umidità, i raggi del sole, oltre che contro microrganismi e parassiti potenzialmente nocivi. Funziona anche come travestimento per confondere i predatori, mentre i disegni particolari del manto permettono ai membri della stessa specie di riconoscersi tra loro. Inoltre i mammiferi possono usare la loro pelliccia per esibizioni sociali, per indicare aggressività o agitazione: quando un cane «rizza il pelo» alzando involontariamente i peli sul collo e la schiena, sta chiaramente invitando i suoi sfidanti a stare alla larga.

Tuttavia, benché la pelliccia svolga queste importanti funzioni, alcune linee filogenetiche di mammiferi hanno evoluto peli così radi e sottili da essere inutilizzabili. Molte di queste creature vivono sottoterra o in acqua. Nei mammiferi sotterranei, come l'eterocefalo glabro (*Heterocephalus glabrus*, o talpa senza pelo), l'assenza di peli si è evoluta come risposta a una vita in grandi colonie sotterranee, dove i benefici dei peli sono superflui, poiché al buio gli animali non si possono vedere tra loro e la loro struttura sociale è tale che per scaldarsi si stringono semplicemente l'uno all'altro. Nei mammiferi marini che non si spingono mai sulla terraferma, come le balene, la pelle nuda facilita il nuoto, riducendo l'attrito sulla superficie della pelle. Per compensare l'assenza di isolamento esterno, questi animali hanno il grasso sotto pelle. Al contrario, i mammiferi semiacquatici – per esempio la lontra – hanno una pelliccia densa e impermeabile che intrappola aria facilitando il galleggiamento, oltre a proteggere l'epidermide sulla terraferma.

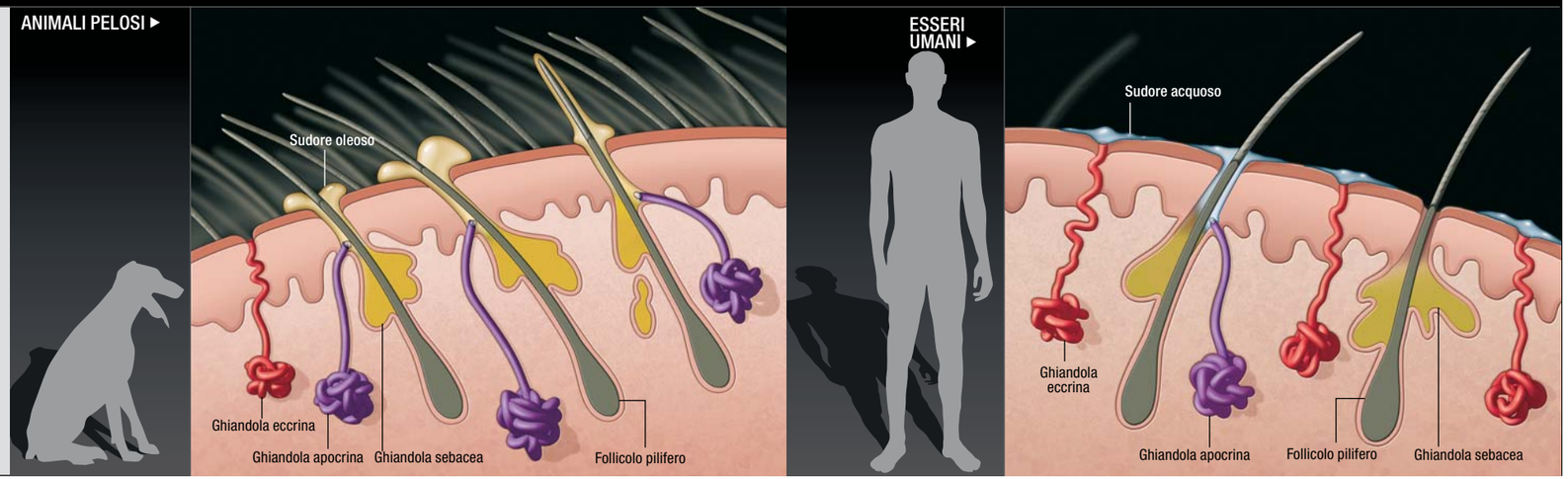
IN SINTESI

- Gli esseri umani sono l'unica specie di primati con la pelle quasi completamente nuda.
- La perdita della pelliccia è stata un adattamento al cambiamento delle condizioni ambientali, che costrinsero i nostri antenati a coprire lunghe distanze per cercare acqua e cibo.
- L'analisi dei fossili e i geni ci indicano quando è avvenuta questa trasformazione.
- L'evoluzione dell'assenza di peli, insieme ad altri fattori, ha reso possibile l'emergere del nostro grande cervello e del pensiero simbolico.

Dorit Thies

Peloso vs. nudo

La pelle umana nuda è più efficiente della pelliccia nell'eliminare il calore in eccesso. I mammiferi hanno tre tipi di ghiandole per questa funzione: apocrine, eccrine e sebacee. In gran parte dei casi lo strato più esterno della pelle, l'epidermide, contiene molte ghiandole apocrine, che sono raggruppate alla base dei follicoli piliferi, e rivestono il pelo di sudore oleoso. L'evaporazione di questo sudore, che raffredda estraendo calore dalla pelle, avviene alla superficie del pelo. Ma più l'animale traspira meno efficiente è l'eliminazione del calore, perché il pelo infeltrisce, ostacolando l'evaporazione.
Nell'epidermide umana prevalgono invece le ghiandole eccrine. Situate vicino alla superficie della pelle, rilasciano un sudore liquido e acquoso da microscopici pori. Oltre a evaporare direttamente dalla superficie della pelle, il sudore eccrino lo fa più rapidamente, migliorando il raffreddamento.



Anche i più grandi mammiferi terrestri – elefanti, rinoceronti e ippopotami – hanno evoluto la pelle nuda perché sono sempre esposti al costante rischio del surriscaldamento. Più grande è l'animale, minore è la superficie in relazione alla massa corporea, e quindi è più difficile liberarsi del calore in eccesso. (D'altro canto, i topi e altri piccoli animali, che hanno un alto rapporto tra superficie e volume, spesso hanno difficoltà a mantenere sufficiente calore.) Durante il Pleistocene, da due milioni a 10.000 anni fa, i mammut e altri parenti degli elefanti e dei rinoceronti moderni erano «lanosi» perché vivevano in ambienti freddi, e l'isolante esterno li aiutava a conservare il calore corporeo, riducendo il bisogno di cibo. Oggi però tutti i grandi erbivori abitano in ambienti torridi, dove una pelliccia sarebbe mortale per bestioni di quella stazza.

Ma l'assenza di peli nella specie umana non è un adattamento evolutivo alla vita sotterranea o acquatica, nonostante la teoria della scimmia acquatica (*si veda il box a fronte*), né è conseguenza di una grande massa corporea. La nostra pelle nuda è legata all'esigenza di rimanere freschi, come suggerisce la nostra grande capacità di sudare.

Il dovere di sudare

Restare freschi è un grosso problema per molti mammiferi, non solo per quelli grandi, specialmente se vivono in luoghi caldi e generano abbondante calore correndo o camminando a lungo. Questi animali devono regolare attentamente la temperatura corporea interna perché tessuti e organi, in particolare il cervello, possono subire danni con il surriscaldamento.

L'AUTORE

NINA G. JABLONSKI dirige il dipartimento di antropologia della Pennsylvania State University. La sua ricerca verte sulla storia naturale della pelle umana, l'origine del bipedismo, l'evoluzione e la biogeografia della scimmie del Vecchio Mondo e la paleoecologia dei mammiferi negli ultimi due milioni di anni. Ha condotto ricerche sul campo in Cina, Nepal e Kenya.

I mammiferi usano diversi modi per evitare di andare a fuoco: i cani ansimano, molte specie feline sono più attive durante le ore fresche della sera e molte antilopi possono eliminare il calore del sangue nelle arterie passandolo al sangue di piccole vene che è stato raffreddato respirando attraverso il naso. Nei primati, esseri umani compresi, la strategia principale è il sudore. Sudare raffredda il corpo producendo sulla superficie della pelle un liquido che poi evapora, estraendo nel processo energia termica dalla pelle. Questo meccanismo di raffreddamento funziona con lo stesso principio di un refrigeratore a evaporazione, ed è molto efficace nel prevenire il pericoloso surriscaldamento del cervello e delle altri parti del corpo.

Ma non tutto il sudore è uguale. La pelle dei mammiferi contiene tre tipi di ghiandole: sebacee, apocrine ed eccrine, che insieme producono il sudore. In gran parte delle specie le principali ghiandole del sudore sono quelle sebacee e apocrine. Situate vicino alla base dei follicoli piliferi, le loro secrezioni si combinano coprendo i peli con una miscela oleosa, a volte persino schiumosa (si pensi alla spuma generata da un cavallo al galoppo). Questo tipo di sudore schiumoso aiuta a raffreddare gli animali coperti di pelliccia, ma ha una limitata capacità di dissipare il calore.

Quasi vent'anni fa, G. Edgar Folk Jr., dell'Università dell'Iowa, e i suoi collaboratori dimostrarono che il raffreddamento diminuisce man mano che il pelo dell'animale si bagna e si copre di questo sudore denso e oleoso. La perdita di efficienza è causata dall'evaporazione che avviene sulla superficie della pelliccia, non della pelle stessa, così da impedire il trasferimento di calore. In condizioni estreme, il trasferimento di calore è inefficiente, e l'animale deve bere grandi quantità d'acqua, non sempre immediatamente disponibile. I mammiferi ricoperti di pelo obbligati a compiere sforzi fisici intensi o per periodi prolungati nelle ore calde del giorno collasseranno per l'eccessivo calore.

Oltre all'assenza di pelliccia, gli esseri umani hanno un numero straordinario di ghiandole eccrine, tra i 2 e i cinque 5, che possono produrre fino a 12 litri al giorno di sudore molto liquido e acquoso. Le ghiandole eccrine non si radunano vicino ai follicoli piliferi, ma sono invece situate relativamente vicino alla superficie della pelle e rilasciano il sudore attraverso piccoli pori. Questa combinazione di pelle nuda e sudore acquoso direttamente sulla superficie, e non raccolto dalla pelliccia, permette agli esseri umani di eliminare il calore in eccesso con grande efficienza. Secondo uno studio di Daniel E. Lieberman di Harvard e di Dennis M. Bramble dell'Università dello Utah, pubblicato nel 2007 su «Sports Medicine», il nostro sistema di raffreddamento è talmente superiore che, disputando una maratona in un giorno caldo, un essere umano potrebbe battere un cavallo.

Mostrare un po' di pelle

Poiché gli esseri umani sono gli unici primati senza pelliccia e con un'abbondanza di ghiandole eccrine, da quando la nostra linea evolutiva ominide si è staccata dal ramo che porta al nostro più vicino parente vivente, lo scimpanzè, deve essere successo qualcosa che ha favorito l'emergere di una pelle nuda e sudata. E non è poi sorprendente che la trasformazione sia probabilmente iniziata con un cambiamento climatico.

Attraverso lo studio dei fossili di piante e animali è stato possibile ricostruire le condizioni ambientali del passato, determinando che circa 3 milioni di anni fa la Terra è entrata in una fase di raffreddamento globale che ha inaridito l'Africa centro-orientale, dove vivevano i nostri progenitori. Con il declino delle precipitazioni, gli ambienti boscosi preferiti dai primi ominidi hanno

Perché la teoria della scimmia acquatica fa acqua

Tra le diverse ipotesi avanzate per spiegare l'evoluzione della pelle nuda negli umani, la teoria della scimmia acquatica, che suggerisce che la nostra specie abbia avuto una fase acquatica lungo il corso dell'evoluzione, ha richiamato molta attenzione. Enunciata per la prima volta in un articolo di divulgazione del 1960 dallo zoologo inglese sir Alister Hardy, il suo maggior sostenitore è stata la scrittrice Elaine Morgan, che continua a promuovere la teoria in scritti e conferenze.
L'unico problema è che la teoria è sbagliata, e lo si può dimostrare. La teoria della scimmia acquatica sostiene che, tra i 5 e i 7 milioni di anni fa, sollevamenti tettonici nella Rift Valley in Africa orientale avrebbero isolato i primi antenati umani dai loro ambienti preferiti di foreste tropicali. Di conseguenza, essi si sarebbero adattati a una vita semiacquatica nelle paludi, lungo le coste e nelle piane alluvionali, dove avrebbero vissuto per circa un milione di anni. Le prove di questa fase acquatica, sostiene la Morgan, risiedono in alcuni dei caratteri anatomici che gli umani condividono con i mammiferi acquatici e semiacquatici, ma non con i mammiferi della savana, tra cui la pelle senza peli, un numero ridotto di ghiandole apocrine, e i depositi di grasso situati direttamente sotto pelle.
La teoria è sbagliata per tre ragioni. In primo luogo, i mammiferi acquatici differiscono molto tra loro nel grado in cui presentano i tratti acquatici della Morgan. Quindi non c'è una semplice relazione tra, per esempio, la quantità di peli di un animale e l'ambiente in cui vive. La seconda è legata ai dati fossili, che mostrano come gli ambienti acquatici fossero pieni di coccodrilli affamati e ippopotami aggressivi. I nostri piccoli e indifesi antenati non avrebbero avuto scampo contro queste creature. Terzo motivo, la teoria della scimmia acquatica è troppo complessa. Sostiene che i nostri predecessori abbiano modificato lo stile di vita da terrestre a semiacquatico per poi tornare a tempo pieno sulla terraferma.
Come ha obiettato John H. Langdon, dell'Università di Indianapolis, un'interpretazione più semplice è che gli umani abbiano sempre vissuto sulla terra, e che la spinta per l'evoluzione della pelle nuda sia dovuta al cambiamento climatico che ha favorito le praterie della savana rispetto alle foreste. E, nella scienza, la spiegazione più semplice è spesso corretta.

Cortesia Dong Lin (*Jablonski*); Tami Tolpa (*sezioni di pelle*); Jen Christiansen (*cane e uomo*)

Antenati in movimento

Benché i fossili non abbiano conservato indizi diretti del passato della pelle umana, il periodo dell'evoluzione della nudità è stato stimato in base ad altre informazioni. Protoumani come gli australopitechi (*qui a fianco*) avevano probabilmente uno stile di vita sedentario, perché vivevano in ambienti di foresta, ricchi di vegetali e acqua. L'espansione delle praterie ha spinto i nostri antenati più recenti, come *H. ergaster* (*a fronte*) a coprire distanze maggiori. Questa specie, apparsa circa 1,6 milioni di anni fa, è stata probabilmente la prima ad avere pelle nuda e sudore eccrino, che avrebbe così eliminato il calore in eccesso prodotto dal corpo con questi elevati livelli di attività.

▶ *Australopithecus afarensis*, qui rappresentato dal fossile di Lucy, di 3,2 milioni di anni fa, aveva tratti scimmieschi, con gambe corte poco adatte a coprire lunghe distanze.

▶ *Homo ergaster*, rappresentato qui dal ragazzo del Turkana, di 1,6 milioni di anni fa, è stato il primo ominide con gambe lunghe. Gli arti così allungati facilitavano lunghi spostamenti, in cammino o di corsa.

Victor Deak (*illustrazioni*), Denis Finnin e Jackie Beckett, American Museum of Natural History (*Lucy e ragazzo del Turkana*)

lasciato spazio a praterie e savane, e gli alimenti di cui si cibavano i nostri antenati australopitechi – frutta, foglie, tuberi e semi – divennero più scarsi, distribuiti in aree limitate e soggetti alla disponibilità stagionale, come accadde anche per le fonti d'acqua dolce. In risposta alla diminuzione delle risorse, i nostri progenitori hanno quindi dovuto abbandonare le loro abitudini di approvvigionamento relativamente facili per passare a uno stile di vita molto più attivo solo per riuscire rimanere idratati e ottenere sufficienti calorie, percorrendo distanze maggiori in cerca di acqua e piante commestibili.

Intorno a quell'epoca, gli ominidi iniziarono a introdurre la carne nella dieta, come ci rivelano gli utensili di pietra e le ossa di animali macellati nei ritrovamenti archeologici di circa 2,6 milioni di anni fa. I cibi animali sono molto più ricchi di calorie rispetto ai vegetali, ma sono molto più rari. Gli animali carnivori devono quindi coprire un'area più ampia rispetto agli erbivori per procurarsi una quantità sufficiente di cibo. Inoltre le prede sono bersagli mobili, eccetto le occasionali carcasse, quindi i predatori devono consumare energia in più per ottenere il pasto. Nel caso degli esseri umani, la selezione naturale ha trasformato le proporzioni scimmiesche degli australopitechi, che ancora passavano parte del tempo sugli alberi, in un corpo dalle gambe lunghe, costruito per camminare e correre a lungo. Questa nuova conformazione ha senza dubbio aiutato i nostri antenati a evitare di diventare preda a loro volta quando si trovavano in luoghi aperti.

COMBATTERE IL CALORE

La pelle nuda non è l'unico adattamento umano evoluto per mantenere la giusta temperatura corporea nel torrido clima tropicale dei nostri antenati. Anche gli arti più lunghi, aumentando il rapporto superficie/volume, facilitano la dispersione di calore in eccesso. Questa tendenza sembra continuare ancora oggi. La prova più convincente di questo costante adattamento viene da popolazioni dell'Africa orientale, come i Dinka del Sudan meridionale. Sicuramente non è una coincidenza che questo popolo, che vive in uno dei posti più caldi della Terra, abbia anche arti estremamente allungati.
Perché gli esseri umani moderni esibiscono una simile variabilità nella lunghezza degli arti? Quando i nostri predecessori migrarono fuori dall'Africa tropicale, verso zone più fredde, cambiarono anche le pressioni selettive, permettendo l'evoluzione di diverse forme del corpo.

I maggiori livelli di attività avevano però un costo: un rischio più alto di surriscaldamento. A partire dai primi anni ottanta Peter Wheeler, della John Moores University di Liverpool, ha pubblicato una serie di lavori in cui simulava il calore incontrato dai progenitori degli esseri umani nella savana aperta. Gli studi di Wheeler, insieme alle ricerche che ho pubblicato con i miei colleghi nel 1994, hanno evidenziato che l'aumento delle distanze percorse correndo e camminando, quando l'attività muscolare produce calore interno, ha richiesto il miglioramento della capacità sudorifera eccrina e la scomparsa dei peli corporei per evitare il surriscaldamento.

Quando è avvenuta questa metamorfosi? Per quanto i fossili umani non abbiano conservato la pelle, abbiamo un'idea di massima del momento in cui i nostri progenitori hanno iniziato a impegnarsi nei moderni modelli di spostamento. Gli studi condotti indipendentemente da Lieberman e da Christopher Ruff della Johns Hopkins University hanno messo in evidenza che circa 1,6 milioni di anni fa un antico membro del nostro genere chiamato *Homo ergaster* aveva evoluto proporzioni corporee essenzialmente moderne, che permettevano lunghi spostamenti di corsa o in cammino. Inoltre, i dettagli delle superfici articolari della caviglia, del ginocchio e dell'anca hanno dimostrato che gli ominidi compivano questo tipo di sforzi. Perciò, secondo i dati fossili, la transizione verso la pelle nuda e un sistema di sudorazione basato sulle ghiandole eccrine doveva già essere in corso 1,6 milioni di anni fa, così da poter gestire il maggiore carico di calore che accompagnava i nuovi e faticosi stili di vita dei nostri predecessori.

Un altro indizio sull'epoca dell'evoluzione della pelle nuda è giunto dalle ricerche sulla genetica del colore della pelle. Un ingegnoso studio del 2004 di Alan R. Rogers e colleghi, dell'Università dello Utah, ha esaminato le sequenze del gene umano *MC1R*, uno dei geni responsabili della pigmentazione della pelle, dimostrando che una specifica variazione genetica rintracciata in tutti gli africani con la pelle scura ha avuto origine circa 1,2 milioni di anni fa. Probabilmente i progenitori umani avevano una pelle chiara coperta da pelo scuro, simile a quella degli scimpanzè, perciò l'evoluzione di una pelle scura è stata probabilmente una necessaria conseguenza evolutiva della perdita dei peli che proteggevano dalla radiazione solare. La stima di Rogers quindi pone un limite temporale minimo per l'alba della nudità.

Sotto pelle

Se siamo ragionevolmente sicuri di quando e perché ci siamo denudati, meno certezze riguardano invece il modo in cui è avvenuta l'evoluzione della carne esposta. Gli indizi genetici per l'evoluzione della nudità sono stati difficili da trovare, perché i geni coinvolti nello sviluppo e nella funzione della pelle sono molti. Tuttavia, nuove informazioni sono emerse dal confronto su larga scala delle lettere del codice del DNA, i nucleotidi, nei genomi di diversi organismi.

Diventare glabri non è stata solo la soluzione di un problema, ma ha avuto importanti conseguenze sulle fasi successive dell'evoluzione umana

Il confronto tra il genoma umano e quello dello scimpanzè ha rivelato che una delle differenze più importanti tra il nostro DNA e quello del primate che ci è geneticamente più vicino è proprio nei geni che codificano per le proteine che controllano le proprietà della pelle. Le versioni umane di alcuni di questi geni producono proteine che aiutano a rendere la nostra pelle particolarmente impermeabile e resistente alle abrasioni: caratteristiche fondamentali, vista l'assenza di una pelliccia protettiva. Questa scoperta implica che l'avvento di queste varianti geniche ha contribuito all'origine della nudità, mitigandone le conseguenze.

Le eccezionali capacità protettive della nostra pelle sono proprio dovute alla struttura degli strati più esterni dell'epidermide, il cosiddetto strato corneo. Questo strato è stato paragonato a una composizione di malta e mattoni: i mattoni sono i diversi strati appiattiti di cellule morte dette corneociti, che contengono cheratina (una proteina) e altre sostanze; gli strati lipidici ultrasottili che circondano ogni corneocita costituiscono la malta.

Gran parte dei geni che regolano lo svilup-

LA COMUNICAZIONE SOCIALE è una funzione importante della pelliccia, dal pelo ritto sul collo per indicare aggressività ai disegni sul mantello per riconoscersi tra membri della stessa specie. Noi esseri umani compensiamo la nostra assenza di pelo con le decorazioni: tatuaggi, gioielli e altri ornamenti. Abbiamo anche espressioni facciali complesse, nonché la capacità di veicolare emozioni attraverso il linguaggio.

po dello strato corneo è antica, e le loro sequenze sono molto ben conservate tra i vertebrati. Il fatto che i geni che regolano lo strato corneo umano siano così unici significa, quindi, che la loro evoluzione è stata importante per la sopravvivenza. Questi geni codificano la produzione di una combinazione molto particolare di proteine, che si trova solo nell'epidermide, che comprende nuovi tipi di cheratina e di involucrina. Diversi laboratori sono ora al lavoro per svelare i meccanismi responsabili della produzione di queste proteine.

Altri ricercatori stanno invece analizzando l'evoluzione delle cheratine nei peli corporei per determinare i meccanismi che li rendono radi e fini sulla pelle umana. A questo scopo Roland Moll, della Philipps-Universität di Marburg, in Germania, e collaboratori hanno mostrato che le cheratine presenti nei peli del corpo umano sono estremamente fragili, e infatti i peli si rompono più facilmente rispetto a quelli degli altri animali. Pubblicata nel 2008, questa scoperta suggerisce che le cheratine dei peli umani non fossero così importanti per la sopravvivenza quanto quelle degli altri primati, e che quindi siano diventate più deboli nel corso del tempo.

Un altro problema che i genetisti vogliono risolvere è la grande quantità di ghiandole eccrine contenute nella pelle umana. Quasi certamente questo accumulo ha avuto luogo grazie a cambiamenti nei geni che determinano il destino delle cellule staminali epidermiche, non specializzate, nell'embrione. Nelle prime fasi dello sviluppo, gruppi di cellule staminali epidermiche in specifici siti interagiscono con le cellule del derma sottostante, e segnali chimici geneticamente determinati all'interno di queste nicchie dirigono il differenziamento di queste cellule in follicoli piliferi, ghiandole eccrine, apocrine, sebacee o semplice epidermide. Ora in molti si stanno occupando delle modalità con cui vengono create e mantenute le nicchie di cellule staminali epidermiche, e questo lavoro dovrebbe chiarire che cosa governa il destino delle cellule epidermiche embrionali e come negli esseri umani tante di queste cellule diventano ghiandole sudoripare eccrine.

UOMINI E PIDOCCHI

Negli ultimi anni, alcuni ricercatori hanno iniziato a studiare i pidocchi per capire perché gli esseri umani hanno perso il pelo. Nel 2003 Mark Pagel, dell'Università di Reading, in Inghilterra, e Walter Bodmer, del John Radcliffe Hospital di Oxford, hanno ipotizzato che gli esseri umani abbiano abbandonato la pelliccia per liberarsi dei pidocchi e degli altri parassiti che si annidano tra i peli, e per mostrare così la salute della propria pelle. Altre ricerche hanno invece analizzato i pidocchi del corpo e della testa per capire quando i nostri antenati hanno iniziato a coprirsi con pelli e vestiti. Benché si cibino di sangue, i pidocchi del corpo vivono nei vestiti; di conseguenza la loro origine fornisce una stima minima per l'apparizione dell'abbigliamento ominide. Confrontando la sequenze di geni degli organismi, si può risalire all'origine della specie. Queste analisi hanno mostrato che i pidocchi dei capelli hanno infestato gli umani sin dall'inizio, mentre i pidocchi del corpo si sono evoluti molto dopo. Il momento della loro apparizione sembra suggerire che gli esseri umani siano rimasti nudi per più di un milione di anni.

Nudi, ma non del tutto

Qualunque sia stato il modo in cui siamo diventati scimmie nude, l'evoluzione ha però lasciato al coperto alcune parti del corpo. Una spiegazione della perdita della pelliccia deve quindi spiegare anche perché ce l'abbiamo ancora in alcuni punti. I peli sotto le ascelle e sull'inguine servono probabilmente sia per propagare i feromoni (molecole chimiche che servono a suscitare una risposta comportamentale di altri individui) sia per mantenere lubrificate queste aree durante la locomozione.

I capelli sono stati conservati, probabilmente, per proteggersi contro il surriscaldamento della testa. Per quanto sembri paradossale, avere una densa copertura di peli sulla testa crea uno strato protettivo d'aria tra la pelle che suda e la superficie calda dei capelli. Quindi in una giornata torrida i capelli assorbono il calore, mentre lo strato d'aria rimane più fresco, permettendo al sudore sul cuoio capelluto di evaporare in quello strato d'aria. I capelli molto ricci forniscono la copertura ottimale della testa, perché aumentano lo spessore dello spazio tra la superficie dei capelli e la pelle, così che possa passarci dell'aria.

C'è ancora molto da chiarire sull'evoluzione dei capelli nella nostra specie, ma è possibile che i capelli ricci siano stati la condizione originale negli esseri umani moderni, e che gli altri tipi di capelli si siano evoluti con la dispersione della specie fuori dall'Africa.

Per quanto riguarda i peli sul corpo, il problema è la loro variabilità. Molte popolazioni umane sono quasi completamente glabre, mentre altre sono decisamente irsute. Quelle con meno peli tendono ad abitare la fascia tropicale, mentre le più pelose vivono fuori da quell'area. Questi peli non generano però un sensibile calore; le differenze di pelosità derivano chiaramente dal testosterone, perché in ogni popolazione i maschi sono più pelosi delle femmine.

Diverse teorie hanno cercato di spiegare questo squilibrio in termini di selezione sessuale. Per esempio una di esse ipotizza che le femmine preferiscano i maschi con barbe folte e più peli sul corpo perché questi caratteri si accompagnano a forza e virilità. Un'altra suppone che i maschi abbiano evoluto una preferenza per le femmine con tratti più giovanili. Sono tutte ipotesi interessanti, ma nessuno le ha effettivamente messe alla prova in una popolazione moderna; quindi non sappiamo se per esempio gli uomini pelosi sono davvero più vigorosi o fertili rispetto alle controparti più lisce. In assenza di prove empiriche, la spiegazione della variabilità dei peli umani è ancora oggetto di speculazione.

L'importanza di essere nudi

Spogliarsi della pelliccia non è stato semplicemente un modo per risolvere alcuni problemi, ma ha avuto importanti conseguenze per l'evoluzione umana successiva. La perdita di gran parte dei nostri peli e l'acquisizione della capacità di dissipare il calore in eccesso per mezzo del sudore eccrino hanno aiutato a rendere possibile la grande espansione del nostro organo più sensibile alla temperatura, il cervello. Mentre gli australopitechi avevano cervelli con una capacità di circa 400 centimetri cubi (simile a quello di uno scimpanzè), *H. ergaster* aveva un cervello di capacità doppia. E in un milione di anni il cervello umano si è gonfiato di altri 400 centimetri cubi, arrivando alle dimensioni attuali. Non c'è dubbio che altri fattori hanno influenzato l'espansione della nostra materia grigia, come l'adozione di una dieta sufficientemente calorica da alimentare questo tessuto così energivoro. Ma perdere il pelo è stato sicuramente un passo cruciale per diventare dei cervelloni.

L'assenza di peli ha anche avuto conseguenze sociali. Per quanto possiamo tecnicamente rizzare e abbassare il pelo contraendo e rilassando i piccoli muscoli alla base dei nostri follicoli, i nostri peli corporei sono così sottili e radi che non li esibiamo molto, a confronto delle esibizioni di cani e gatti o dei nostri cugini scimpanzè. Né abbiamo la visibilità o il mimetismo connaturati alle strisce della zebra e alle macchie del leopardo. In realtà, si può anche ipotizzare che caratteri umani universali, come il rossore sociale e le complesse espressioni facciali si siano evoluti per compensare la perduta capacità di comunicare tramite il pelo. Analogamente le pitture sul corpo, il trucco cosmetico, i tatuaggi e altri tipo di decorazioni sulla pelle sono presenti in diverse combinazioni in tutte le culture, perché veicolano appartenenza al gruppo, status e altre informazioni sociali fondamentali prima codificate dalla pelliccia.

Usiamo anche la postura e la gestualità per trasmettere i nostri stati emotivi e le nostre intenzioni. E usiamo il linguaggio per spiegare ciò che pensiamo. In questa prospettiva, la pelle nuda non ci ha solo raffreddato: ci ha reso esseri umani. ■

➥ Letture

Genetic variation at the MC1R Locus and the Time since Loss of human Body Hair. Rogers A.R., Iltis D. e Wooding S., in «Current Anthropology», Vol. 45, n.1, pp. 105-108, febbraio 2008.

The evolution of marathon running: capabilities in humans. Lieberman D.E. e Bramble D.M., in «Sports Medicine», Vol. 37, n.4-5, pp. 288-290, 2007.

Skin. A Natural History. Jablonski N.G., University of California Press, 2006.

Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome. Chimpanzee Sequencing and Analysis Consoortium, in «Nature», Vol. 437, pp.69-87, 1° settembre 2005.

Il colore della pelle. Jablonski N.G. e Chaplin G., in «Le Scienze» n. 412, dicembre 2002.

Heinrich van Den Berg/Getty Images (*ghepardo*); Henry Hornstein/Getty Images (*tatuaggi*)

Mark Wilson/Getty Images (*donna*); Getty Images (*Obama*)

Nuvoloso, con probabilità di stelle

Dall'interazione tra nubi interstellari e stelle massicce possono formarsi nuovi astri

di Erick T. Young

IN SINTESI

- Negli ultimi anni la teoria della formazione stellare ha compiuto rilevanti progressi, ma ha ancora gravi lacune. Le stelle nascono dal collasso di nubi di gas, ma da dove arrivano queste nubi e che cosa ne provoca il collasso?
- Inoltre, la teoria standard della formazione considera le stelle come corpi isolati, quindi trascura le interazioni tra le stelle e le interazioni delle stelle con le nubi da cui sono nate.
- Gli astronomi stanno facendo progressi nel colmare queste lacune. Per esempio hanno osservato il modo in cui le stelle massicce possono innescare il collasso delle nubi e il modo in cui stelle neonate possono espellere altre stelle nello spazio profondo.

Si potrebbe pensare che ormai gli astronomi sappiano perfettamente come si formano le stelle. L'idea base della formazione stellare risale a Immanuel Kant e Pierre-Simon Laplace nel XVIII secolo, e i dettagli dei processi grazie a cui le stelle emettono luce ed evolvono sono stati chiariti dai fisici nella prima metà del XX secolo. Oggi i principi che governano le stelle sono insegnati a scuola, e concetti stravaganti come quello di materia oscura sono pubblicati sui quotidiani. Il problema della formazione stellare, dunque, potrebbe sembrare risolto. Ma nulla è più lontano dal vero. La nascita delle stelle rimane uno dei settori di ricerca più vivaci dell'astrofisica.

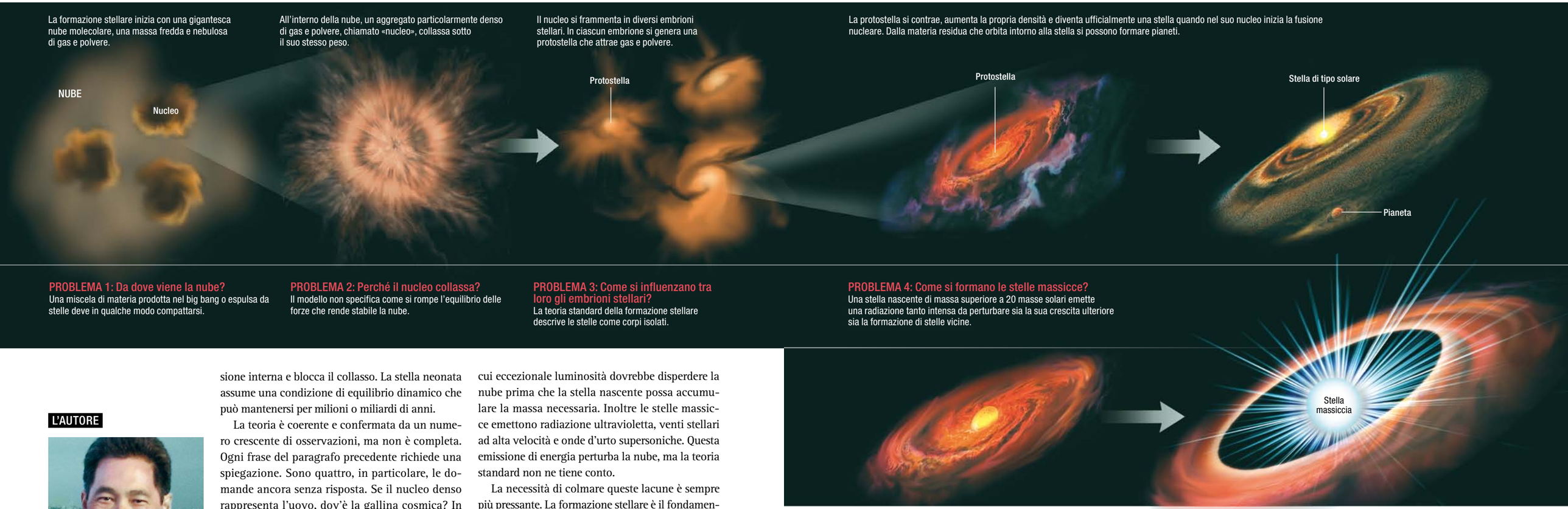
Spiegato nel modo più semplice, si tratta di un processo in cui la gravità vince sulla pressione. Il punto di partenza è un'enorme nube di gas e polvere nello spazio interstellare. Se la nube – o, più spesso, una sua regione di maggiore densità chiamata nucleo – è sufficientemente fredda e densa, l'attrazione centripeta della gravità ha la meglio sulla spinta esercitata verso l'esterno dalla pressione del gas, e la nube inizia a collassare per effetto del suo stesso peso. La densità e la temperatura della nube, o del suo nucleo centrale, aumentano fino a innescare la fusione nucleare. Il calore generato dalla fusione aumenta progressivamente la pres-

Cortesia NASA/ESA/Hubble Heritage Team (STSCI/AURA)

NIDO DI STELLE. Lo scorso anno, grazie alla nuova Wide Field Camera 3, il telescopio spaziale Hubble ha individuato una regione dove si formano le stelle vicino al nucleo della galassia M83. La teoria standard non spiega la formazione delle massicce stelle blu e non spiega neanche il meccanismo con cui queste stelle restituiscono energia alle nubi di gas da cui hanno avuto origine.

È nata una stella, con qualche difficoltà

La teoria standard della formazione stellare descrive adeguatamente la nascita di stelle isolate di massa piccola e media, ma presenta lacune concettuali.



Cortesia Erick T. Young (*Young*); Don Dixon (*formazione stellare*)

L'AUTORE

ERICK T. YOUNG è direttore della missione scientifica dello Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA). Dal 1978 al 2009 ha ricoperto la carica di astronomo allo Steward Observatory dell'Università dell'Arizona. Ha fatto parte dei gruppi di ricerca di quasi tutti i principali strumenti che osservano nell'infrarosso dallo spazio, tra cui l'Infrared Astronomical Satellite, l'Infrared Space Observatory, la NICMOS Camera e la Wide Field Camera 3 del telescopio spaziale Hubble, il telescopio spaziale Spitzer e il telescopio spaziale James Webb, che verrà lanciato nei prossimi anni.

sione interna e blocca il collasso. La stella neonata assume una condizione di equilibrio dinamico che può mantenersi per milioni o miliardi di anni.

La teoria è coerente e confermata da un numero crescente di osservazioni, ma non è completa. Ogni frase del paragrafo precedente richiede una spiegazione. Sono quattro, in particolare, le domande ancora senza risposta. Se il nucleo denso rappresenta l'uovo, dov'è la gallina cosmica? In altri termini: anche le nubi devono avere un'origine, ma la loro formazione non è ancora chiara. E perché il nucleo collassa? Il meccanismo di innesco è importante, visto che determina la velocità di formazione e la massa finale delle stelle.

In che modo gli embrioni di stelle si influenzano tra loro? La teoria standard descrive le stelle come se fossero isolate, ma non spiega che cosa avviene quando si formano in gruppi compatti, come invece accade nella maggior parte dei casi. Secondo recenti scoperte il Sole è nato in un ammasso che poi si è disperso (si veda *Le sorelle perdute del Sole*, di Simon F. Portegies Zwart, in «Le Scienze» n. 497, gennaio 2010). Che differenza c'è tra crescere in un nido affollato ed essere figli unici?

Ultima domanda: come si formano le stelle estremamente massicce? La teoria standard va bene fino a stelle circa 20 volte più grandi del Sole, ma non funziona più per stelle più massicce, la cui eccezionale luminosità dovrebbe disperdere la nube prima che la stella nascente possa accumulare la massa necessaria. Inoltre le stelle massicce emettono radiazione ultravioletta, venti stellari ad alta velocità e onde d'urto supersoniche. Questa emissione di energia perturba la nube, ma la teoria standard non ne tiene conto.

La necessità di colmare queste lacune è sempre più pressante. La formazione stellare è il fondamento della maggior parte dell'astronomia, dalla genesi delle galassie a quella dei pianeti. Senza conoscerla a fondo, è impossibile pensare di analizzare galassie lontane o di interpretare in modo coerente i pianeti individuati al di fuori del sistema solare. Sebbene le risposte definitive rimangano sfuggenti, sta emergendo un filo conduttore: una teoria più sofisticata della formazione stellare deve considerare l'ambiente della stella nascente. Lo stato finale della nuova stella dipende non solo dalle condizioni iniziali del nucleo, ma anche dalle influenze successive provenienti dalla regione circostante e dalle stelle vicine. È il vecchio dilemma dei caratteri innati o acquisiti, trasferito a scala cosmica.

Immerse nella polvere

Se si osserva il cielo da un luogo abbastanza buio si può ammirare la Via Lattea, la cui diffusa luminosità è interrotta da macchie scure. Sono le nubi interstellari, composte da particelle di polvere che bloccano la luce stellare rendendo le stesse nubi opache alla radiazione visibile.

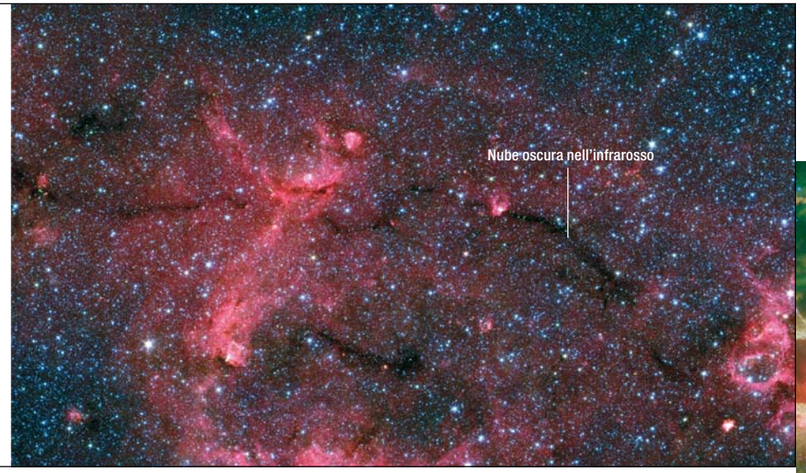
Gli astronomi devono quindi affrontare un problema fondamentale: la nascita delle stelle avviene nell'oscurità. La materia che va a formare le stelle è fitta e scura; deve diventare abbastanza densa da innescare la fusione nucleare, ma non è ancora arrivata a questo punto. È possibile osservare l'inizio e la fine del processo, ma le fasi intermedie sono difficili da studiare perché gran parte della radiazione è emessa alle lunghezze d'onda dell'infrarosso lontano e delle onde submillimetriche, una regione dello spettro per cui gli strumenti degli astronomi sono relativamente primitivi.

Si ipotizza che le nubi dove nascono le stelle facciano parte del ciclo del mezzo interstellare, in cui gas e polvere passano dalle nubi alle stelle e poi di nuovo alle nubi. Questo mezzo è composto prevalentemente da idrogeno; l'elio costituisce un quarto della sua massa, gli altri elementi costituiscono una frazione esigua. Una certa quantità di mezzo è materia primordiale rimasta quasi immutata dopo i primi tre minuti dal big bang: una parte è emessa durante la vita delle stelle, un'altra è formata da resti di stelle esplose. La radiazione stellare scinde le molecole di idrogeno in atomi di idrogeno (si veda *Il gas fra le stelle*, di Ronald J. Reynolds, in «Le Scienze» n. 402, febbraio 2002).

All'inizio il gas è rarefatto, con una densità di circa un atomo di idrogeno per centimetro cubo. Raffreddandosi forma però nubi distinte, proprio come il vapore acqueo condensa nell'atmosfera terrestre. Il gas si raffredda irradiando calore, ma il processo non è immediato, perché c'è solo un numero limitato di meccanismi che permettono

Le oscure origini delle nubi interstellari

Gli astronomi hanno identificato le fasi attraverso cui le nubi si aggregano partendo da gas interstellare rarefatto per diventare via via più dense. Lo stadio immediatamente precedente alla formazione di una protostella è rappresentato dalle cosiddette nubi oscure nell'infrarosso. Opache anche alla radiazione infrarossa, queste nubi appaiono come strisce scure in questa immagine del Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire (GLIMPSE), ottenuta dal telescopio spaziale Spitzer. La massa e l'estensione delle nubi nell'immagine sono perfettamente adatte alla formazione di stelle.



Cortesia GLIMPSE Team/Università del Wisconsin a Madison

al calore di sfuggire. Il più efficiente è l'emissione nell'infrarosso lontano da parte di alcuni elementi: per esempio la radiazione con lunghezza d'onda di 158 micrometri emessa dal carbonio ionizzato. La bassa atmosfera è opaca a queste lunghezze d'onda, quindi per osservarle servono strumenti nello spazio, come lo Herschel Space Observatory, lanciato lo scorso anno dall'Agenzia spaziale europea, o telescopi montati su aerei, come lo Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA).

Raffreddandosi, le nubi diventano più dense. Quando la densità raggiunge 1000 atomi per centimetro cubo, sono abbastanza spesse da bloccare la radiazione ultravioletta emessa dalla galassia. A questo punto gli atomi di idrogeno possono combinarsi in molecole grazie a un complicato processo che coinvolge i grani di polvere. Le osservazioni nelle onde radio hanno dimostrato che le nubi molecolari contengono composti che vanno dall'idrogeno (H_2) fino a complesse molecole organiche, che potrebbero aver «seminato» la vita sulla Terra (si veda *Dallo spazio le molecole della vita*, di Max P. Bernstein, Scott A. Sandford e Louis J. Allamandola, in «Le Scienze» n. 373, settembre 1999). Da questo momento in poi, il processo è difficile da seguire. Le osservazioni nell'infrarosso hanno scoperto stelle in via di formazione avvolte nella polvere, ma hanno problemi nell'osservare i primi passaggi che dalla nube molecolare portano alla protostella.

Nel caso dei primissimi passaggi della formazione, la situazione è cambiata a metà degli anni novanta, quando il Midcourse Space Experiment e l'Infrared Space Observatory hanno scoperto nubi tanto dense (oltre 10.000 atomi per centimetro cubo) da essere opache anche alle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico, che normalmente attraversano le regioni ricche di polvere. Queste nubi sono molto più massicce (da 100 a 100.000 masse solari) di quelle individuate alle lunghezze d'onda del visibile. Negli ultimi anni, grazie allo Spitzer Space Telescope, sono iniziate due campagne di ricognizione sistematica di questi oggetti: la Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire (GLIMPSE), diretta da Edward B. Churchwell, dell'Università del Wisconsin a Madison, e MIPSGAL, coordinata da Sean Carey, dello Spitzer Science Center. Queste nubi sembrano essere l'anello mancante tra nubi molecolari e protostelle.

In effetti, il calcolo delle masse indica che le nubi oscure e i nuclei densi potrebbero rappresentare lo stadio cruciale della formazione stellare. Le nubi hanno un ampio intervallo di masse, e quelle piccole sono più comuni. Questa distribuzione di masse coincide bene con quella delle stelle, a eccezione del fatto che le nubi hanno sempre una massa tripla rispetto a quella delle stelle, suggerendo che solo un terzo della massa di una nube finisce nella stella, mentre il resto si disperde nello spazio.

Resta da dimostrare se la similitudine nella distribuzione sia una mera coincidenza oppure sia causata da qualche fattore. Il meccanismo che determina la massa di una stella ne decide l'intera esistenza: una stella massiccia muore giovane in un'esplosione catastrofica, mentre una più modesta vive a lungo e svanisce senza fare troppo chiasso.

Chi preme il grilletto?

Anche la soluzione del secondo problema – perché collassano nubi e nuclei – sembra più vicina. Nel modello standard della formazione stellare il nucleo è in una situazione di equilibrio: gravità e pressione esterna sono bilanciate dalla pressione interna, di origine termica, magnetica o turbolenta. Quando l'equilibrio si rompe a favore della gravità inizia il collasso. Ma che cosa provoca la rottura? Le ipotesi sono molte. La nube potrebbe essere compressa da una forza esterna, come un'esplosione di supernova. Oppure la pressione interna potrebbe diminuire a causa della dissipazione del calore o dei campi magnetici.

Charles Lada, dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, e João Alves dello European Southern Observatory (ESO) sostengono l'ipotesi della lenta dispersione termica. Nelle loro mappe a lunghezze d'onda millimetriche e submillimetriche, a cavallo tra la regione infrarossa e quella delle onde radio, hanno identificato numerosi nuclei isolati, relativamente quiescenti, in nubi vicine tra loro. Alcuni mostrano prove di lenti moti centripeti, e potrebbero essere avviati verso la formazione di una stella. Un ottimo esempio è Barnard 335, nella costellazione dell'Aquila. La sua distribuzione di densità è quella attesa per una nube in cui la pressione termica è quasi in equilibrio con la pressione esterna. Una sorgente infrarossa nel centro potrebbe essere una protostella in fase molto precoce, il che suggerirebbe una rottura dell'equilibrio avvenuta in tempi recentissimi a favore del collasso.

Altri studi hanno scoperto prove di fattori esterni. Thomas Preibisch, del Max-Planck-Institut für Raidoastronomie di Bonn, ha dimostrato che diverse stelle, distribuite in una regione piuttosto ampia nell'associazione stellare denominata Scorpione Superiore, si sono formate quasi nello stesso momento. Una diminuzione simultanea della pressione interna di nuclei diversi sarebbe davvero una coincidenza incredibile. Una spiegazione più plausibile è che l'onda d'urto prodotta da una supernova abbia investito la regione, provocando il collasso dei nuclei. Le prove però non sono chiare, perché una stella massiccia perturba il suo luogo di nascita, e quindi è difficile ricostruire le condizioni della sua formazione. Un altro limite riguarda la difficoltà di osservare stelle di massa più piccola (e meno luminose) nella stessa regione per confermare che si sono formate insieme a quelle più grandi.

Spitzer ha compiuto progressi nel risolvere questi problemi. Lori Allen, del National Optical Astronomy Observatory, e Xavier P. Koenig, dell'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, hanno individuato uno straordinario esempio di fattore esterno nella regione galattica indicata con la sigla W5 (*si veda il box in questa pagina*). Nell'immagine si vedono giovani protostelle immerse in dense «tasche» di gas compresse dalla radiazione di una precedente generazione stellare. Visto che la compressione è un processo rapido, questi oggetti distribuiti in un'ampia regione devono essersi formati quasi simultaneamente. Per riassumere: la formazione delle stelle dipende da molteplici fattori, e non da uno solo, come invece si pensava.

Vita in un nido di stelle

Se non consideriamo le lacune appena discusse, il modello standard spiega bene le osservazioni di nuclei isolati dove è in atto il processo di formazione stellare. Ma molte stelle, forse la maggior parte, hanno origine all'interno di ammassi, e il modello non descrive l'influenza di questo ambiente congestionato sulla loro nascita. Per colmare questa lacuna, in anni recenti sono state elaborate due teorie in competizione, anche grazie ai progressi della potenza di calcolo per le simulazioni. Oggi le osservazioni, in particolare quelle di Spitzer, stanno aiutando capire quale sia più corretta.

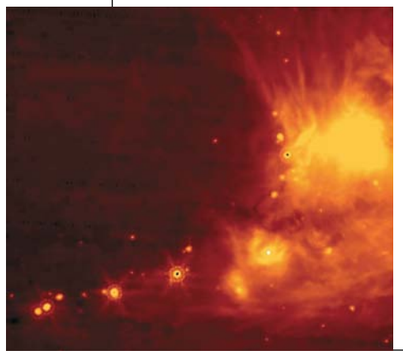
ALTRI ENIGMI STELLARI

La velocità di formazione delle stelle è un altro problema che ha dato filo da torcere agli astronomi. Il «collo di bottiglia» cruciale è la fase finale del collasso, quella in cui la protostella si è già formata ma deve ancora aumentare la sua massa accumulando gas. Un gruppo di ricerca diretto da Neal J. Evans II dell'Università del Texas ad Austin ha osservato con il telescopio spaziale Spitzer regioni di formazione stellare vicine tra loro e ha scoperto che la velocità di accrescimento non è affatto costante. La stella accumula rapidamente fino a metà della sua massa finale, poi però la crescita rallenta; per accumulare la massa restante occorre oltre dieci volte più tempo. Nell'insieme il processo è assai più lungo rispetto alle stime precedenti.
Un altro problema è che il gas delle nubi molecolari è fortemente turbolento e in moto a velocità supersoniche. Gli stessi embrioni stellari potrebbero essere responsabili di tutta questa agitazione. Quasi tutte le protostelle, infatti, emettono getti ad alta velocità (si veda *È nata una stella. Gli enigmi della genesi stellare*, di Thomas P. Ray, in «Le Scienze» n. 386, ottobre 2000).

L'inizio del collasso

I libri di testo di astronomia danno spiegazioni vaghe sul meccanismo che destabilizza e fa collassare le nubi. Le nuove immagini nell'infrarosso di Spitzer mostrano che spesso le responsabili del collasso sono stelle vicine di grande massa.

▲ Nella regione W5 le stelle massicce (*in blu*) hanno prodotto una cavità all'interno di una nube molecolare. Lungo il margine della cavità ci sono protostelle (circondate dal gas bianco e rosa) tutte della stessa età circa. Questa caratteristica indica che la formazione delle protostelle è stata innescata dalle stelle massicce; altri processi non avrebbero avuto questa sincronia.



◀ Nell'ammasso NGC 2068 alcune protostelle sono allineate come perle su un filo. Sebbene siano separate da distanze considerevoli, si sono formate quasi simultaneamente, e di nuovo il principale indiziato è un gruppo vicino di stelle massicce.

Cortesia NASA, JPL/Caltech e Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (*W5*); cortesia Erick T. Young e NASA (*NGC 2068*)

In una delle due teorie il fattore più importante riguarda le interazioni tra nuclei adiacenti. La versione più estrema prevede la formazione di molte piccole protostelle, che si muovono rapidamente nella nube e competono per catturare il gas rimanente. Alcune diventano molto grandi, e le perdenti potrebbero addirittura essere espulse dall'ammasso, formando un gruppo di stelle che vagano nella galassia. Questa tesi è stata sostenuta da Ian Bonnell, dell'Università di St. Andrews, Matthew Bate, dell'Università di Exeter, e altri.

Nel modello alternativo, la principale influenza esterna riguarda la turbolenza del gas. La turbolenza favorisce il collasso, e in effetti la distribuzione delle dimensioni delle stelle rispecchia lo spettro dei moti turbolenti invece che una successiva competizione per l'accumulo di materia. Il modello del nucleo turbolento è stato messo a punto da Christopher McKee, dell'Università della California a Berkeley, Mark Krumholz, dell'Università della California a Santa Cruz, e altri.

Le osservazioni sembrano favorire la teoria del nucleo turbolento (si veda *La misteriosa origine delle nane brune*, di Subhanjoy Mohanty e Ray Jayawardhana, in «Le Scienze» n. 451, marzo 2006), ma quella dell'accrescimento competitivo potrebbe diventare importante in regioni con densità stellare particolarmente elevata. Un caso interessante riguarda l'ammasso dell'Albero di Natale (NGC 2264), nella costellazione dell'Unicorno. Nel visibile, questa regione mostra diverse stelle brillanti e abbondanza di gas e polvere: indizi di formazione di stelle. All'interno della regione Spitzer ha scoperto un denso ammasso con stelle in varie fasi di sviluppo. Questo ammasso è un'istantanea degli stadi del processo in cui la turbolenza o l'accrescimento competitivo dovrebbero lasciare il segno.

Le stelle più giovani, che emettono la percentuale più elevata di radiazione a grandi lunghezze d'onda, sono riunite in un gruppo compatto. Paula Teixeira, dell'ESO, ha dimostrato che si trovano a 0,3 anni luce l'una dall'altra. Questa distribuzione regolare è attesa nel caso di nuclei densi che collassano dalla nube molecolare per effetto della gravità: ciò implica che siano le condizioni iniziali della nube ad avviare il collasso. Ma anche se le osservazioni sembrano favorire la teoria della turbolenza l'elevata risoluzione delle immagini mostra che alcune ipotetiche protostelle non sono oggetti singoli, ma gruppi compatti. Uno di questi gruppi è formato da dieci sorgenti comprese in un raggio di 0,1 anni luce. A queste densità deve verificarsi un accrescimento competitivo, almeno a piccola scala.

Quindi, come per l'innesco del collasso, l'effetto dell'ambiente stellare è variabile. Possono agire sia la turbolenza sia l'accrescimento competitivo, dipende dalla situazione. La natura sembra sfruttare ogni modo possibile per far nascere una stella.

Vivere in un nido affollato

Contrariamente alle ipotesi del modello standard, le stelle neonate possono influenzarsi a vicenda. Spitzer ha individuato un esempio di questa interazione nell'ammasso dell'Albero di Natale (NGC 2264), che contiene un gruppo denso di stelle di diverse età. Ad alta risoluzione si osserva che alcune delle «stelle» più giovani sono in realtà gruppi molto compatti di protostelle: ce ne sono fino a dieci in un raggio di 0,1 anni luce, dunque queste protostelle sono abbastanza vicine da influenzarsi a vicenda.

Cortesia NASA, JPL/Caltech e Paula S. Teixeira, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

L'INFRAROSSO

Le nubi dove si formano le stelle appaiono come macchie scure nel visibile, ma diventano visibili alle lunghezze d'onda infrarosse e radio.

L'infrarosso ha una lunghezza d'onda tra 1 e 1000 micrometri (cioè 1 millimetro). A queste lunghezze d'onda la materia tra 3 e 3000 kelvin emette un picco di radiazione.

La radiazione nell'infrarosso vicino è l'estremo della regione infrarossa a lunghezze più brevi (1-5 micrometri). È luce stellare attenuata da polvere.

L'infrarosso medio e lontano si estende a circa 300 micrometri, ed è emesso soprattutto dalla polvere. L'osservazione a terra è difficile, perché il nostro pianeta emette a questa radiazione e l'atmosfera assorbe l'emissione dallo spazio.

La radiazione submillimetrica, tra 300 e 1000 micrometri, è perfetta per osservare materia interstellare fredda.

Le onde radio hanno lunghezze d'onda ancora più grandi di quelle citate.

Stelle extralarge

Le stelle massicce sono rare e hanno vita breve, ma svolgono un ruolo molto importante nell'evoluzione delle galassie. Queste stelle forniscono energia al mezzo interstellare grazie all'emissione sia di massa sia di radiazione e, al termine della loro esistenza, possono esplodere come supernove, disperdendo materia arricchita di elementi pesanti. La Via Lattea è ricca di bolle e resti di supernova creati da stelle massicce, la cui formazione però è difficile da descrivere con la teoria standard. Quando una protostella raggiunge una massa di circa 20 masse solari la pressione di radiazione dovrebbe vincere la gravità e impedire un ulteriore accrescimento. Oltre alla pressione di radiazione, una stella tanto massiccia genera venti stellari che contribuiscono a disperdere la nube da cui è nata la stessa stella, limitandone ulteriormente la crescita e perturbando la formazione di stelle vicine.

Recenti studi teorici di Krumholz indicano come risolvere il problema. Le sue simulazioni tridimensionali mostrano l'inattesa complessità della crescita stellare. L'afflusso di materia può diventare molto disomogeneo, con regioni dense alternate a bolle da cui esce la radiazione stellare. Quindi la pressione di radiazione potrebbe non ostacolare un'ulteriore crescita. La materia densa in caduta su una stella massiccia genera stelle compagne, un meccanismo che spiegherebbe la rarità delle stelle massicce solitarie. Le regioni di formazione osservate da Spitzer permettono di confermare questo modello, ma probabilmente la verifica sarà complicata. È difficile cogliere le stelle massicce nell'atto della loro nascita, perché sono rare e dalla vita breve.

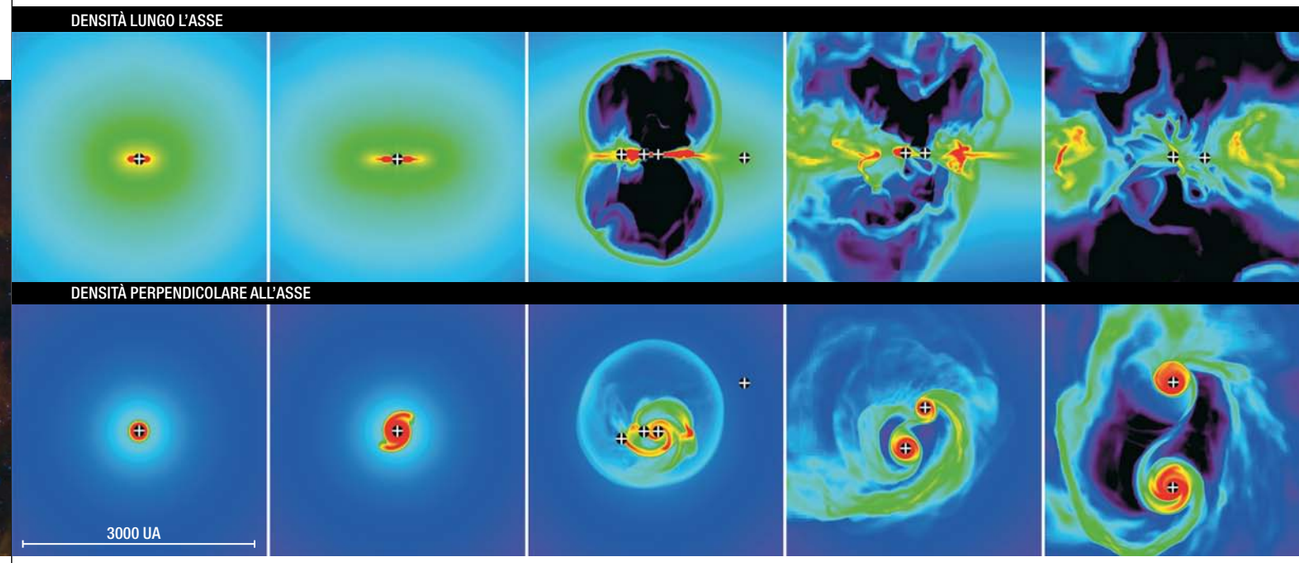
Per fortuna, potremo sfruttare nuovi strumenti. Herschel e SOFIA, un Boeing 747 in volo a una quota superiore al 99 per cento del vapore acqueo in atmosfera, faranno osservazioni a lunghezze d'onda submillimetriche e nell'infrarosso lontano, una regione dello spettro in cui è più facile individuare la nascita di stelle. I due strumenti hanno la risoluzione spettrale e spaziale necessaria a realizzare mappe delle distribuzioni di velocità nelle nubi interstellari. A lunghezze d'onda maggiori, l'Atacama Large Millimeter Array (ALMA), in costruzione sulle Ande cilene, consentirà di mappare singole protostelle con eccezionale dettaglio.

Grazie alle nuove osservazioni, gli astronomi sperano di ricostruire il ciclo di vita completo del mezzo interstellare, dalle nubi atomiche alle nubi molecolari, ai nuclei prestellari, alle stelle e infine di nuovo al gas rarefatto. E sperano di osservare dischi di formazione stellare con una risoluzione angolare sufficiente a individuare l'afflusso di materia dalla nube e a confrontare gli effetti di ambienti diversi sulla nascita delle stelle.

Le risposte avranno profonde conseguenze per altri settori dell'astrofisica. Quello che vediamo, dalle galassie agli esseri viventi, esiste grazie alla formazione delle stelle. La teoria descrive abbastanza bene questo processo, ma alcune lacune ci impediscono di spiegare molti degli aspetti più importanti del cosmo. E proprio da quelle lacune capiamo che la formazione delle stelle è un processo molto più ricco rispetto a quanto credessimo. ■

Sfondare il tetto della massa

Recenti simulazioni della formazione stellare hanno mostrato che una stella massiccia è in grado di raggiungere dimensioni impossibili in teoria, perché la sua crescita non è omogenea. La radiazione emessa dalla protostella respinge il gas, creando colossali vuoti (bolle) proprio all'interno del gas, ma non blocca del tutto l'afflusso di materia, che si raccoglie in filamenti negli interstizi tra le bolle.



17.500 ANNI: Si è formata una protostella su cui il gas cade in modo quasi uniforme. Il gas è luminoso perché durante la caduta libera energia potenziale gravitazionale.

25.000 ANNI: Quando la protostella raggiunge circa 11 masse solari, il disco che la circonda diventa instabile dal punto di vista gravitazionale e assume una forma a spirale.

34.000 ANNI: Quando la protostella supera 17 masse solari, la radiazione respinge il gas e genera bolle. Ma il gas continua a cadere verso il centro passando tra le bolle. Nascono protostelle più piccole.

41.700 ANNI: Una delle protostelle minori cresce più velocemente della stella centrale, e presto acquisisce una massa simile a questa. L'accrescimento è disomogeneo e incostante.

55.900 ANNI: La simulazione termina quando la stella centrale raggiunge 42 masse solari e la sua compagna 29. Rimangono circa 28 masse solari di gas che probabilmente cadranno sui due oggetti.

Da *The Formation of Massive Star Systems by Accretion*, di Mark R. Krumholz e altri, in «Science», Vol 323, 15 gennaio 2009

➥ Letture

Spitzer and Magellan Observations of NGC 2264: A Remarkable Star-Forming Core near IRS-2. Young E.T. e altri, in «Astrophysical Journal», Vol. 642, n. 2, pp. 972-978, 10 maggio 2006. Disponibile on line: **http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601300.**

The Formation of Massive Star Systems by Accretion. Krumholz M.R. e altri, in «Science», Vol. 323, pp. 745-757, 15 gennaio 2009.

The Violent, Mysterious Dynamics of Star Formation. Frank A., in «Discover», febbraio 2009. Disponibile on line: **http://discovermagazine.com/2009/feb/26-violent-mysterious-dynamics-of-star-formation.**

L'arte della guerra dei batteri

Nuove ricerche ci aiutano a capire le strategie con cui i batteri si impadroniscono delle nostre cellule e ingannano il sistema immunitario, e come combatterli con le loro stesse armi

di B. Brett Finlay

Jessica Weisman

La maggior parte dei batteri sono compagni di viaggio educati. In effetti, se vi sentite soli, ricordatevi che in media migliaia di miliardi di microbi vivono sopra e dentro il nostro corpo, superando di circa dieci volte il numero di cellule che lo compongono. Delle decine di migliaia di specie batteriche conosciute, quelle che infrangono le regole della coesistenza pacifica, facendoci ammalare, sono solo un centinaio.

Questi patogeni possono causare grossi guai. A livello globale le malattie infettive sono la seconda causa di morte, e i batteri sono ben rappresentati tra i responsabili. Ogni anno la tubercolosi causa quasi due milioni di morti, e nel XIV secolo *Yersinia pestis*, responsabile della peste bubbonica, sterminò circa un terzo della popolazione europea. Negli ultimi cent'anni sono stati fatti notevoli progressi, mettendo sotto controllo alcune specie con gli antibiotici, ma i batteri dannosi hanno trovato il modo di resistere a molti di questi farmaci. È una corsa agli armamenti che negli ultimi tempi stiamo perdendo, anche perché non conosciamo bene il nemico.

Storicamente, i microbiologi hanno studiato il modo in cui i batteri causano le malattie facendoli crescere in un brodo nutritivo e isolando alcune molecole dalla loro parete esterna, o estraendo le secrezioni dei batteri dal mezzo di coltura per poi esaminarne l'effetto su cellule umane e animali. Questi studi hanno caratterizzato numerose tossine, ma nella maggior parte dei casi hanno ignorato le interazioni tra i patogeni e i loro ospiti. Negli ultimi vent'anni, però, si è scoperto che spesso il comportamento dei batteri patogeni nei terreni di coltura è molto diverso rispetto a quello che manifestano in un potenziale organismo ospite.

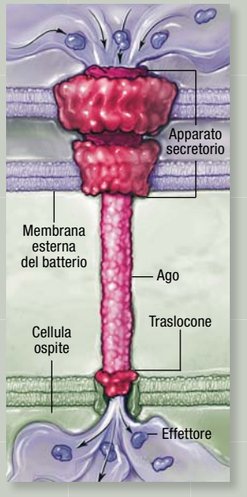
Per entrare negli organi e nei tessuti, e prosperare nei nostri corpi, i batteri si trasformano in esperti della sovversione, impadronendosi di cellule e sistemi di comunicazione cellulari. Molti microbi assumono il controllo grazie a strutture specializzate nell'iniezione di proteine che riprogrammano il macchinario cellulare. Al-

IN SINTESI

- I batteri patogeni si moltiplicano e producono tossine all'interno del loro ospite umano, ma sappiamo ancora poco dei meccanismi che permettono a questi microrganismi di aggirare le nostre difese e somministrare veleni.
- Lo studio delle interazioni tra ospite e patogeni rivela le raffinate strategie adottate dai batteri per manipolare e piegare ai propri fini le cellule ospiti.
- Una nuova e più approfondita conoscenza di strumenti e tattiche dei batteri sta portando a nuovi approcci nella battaglia contro i patogeni.

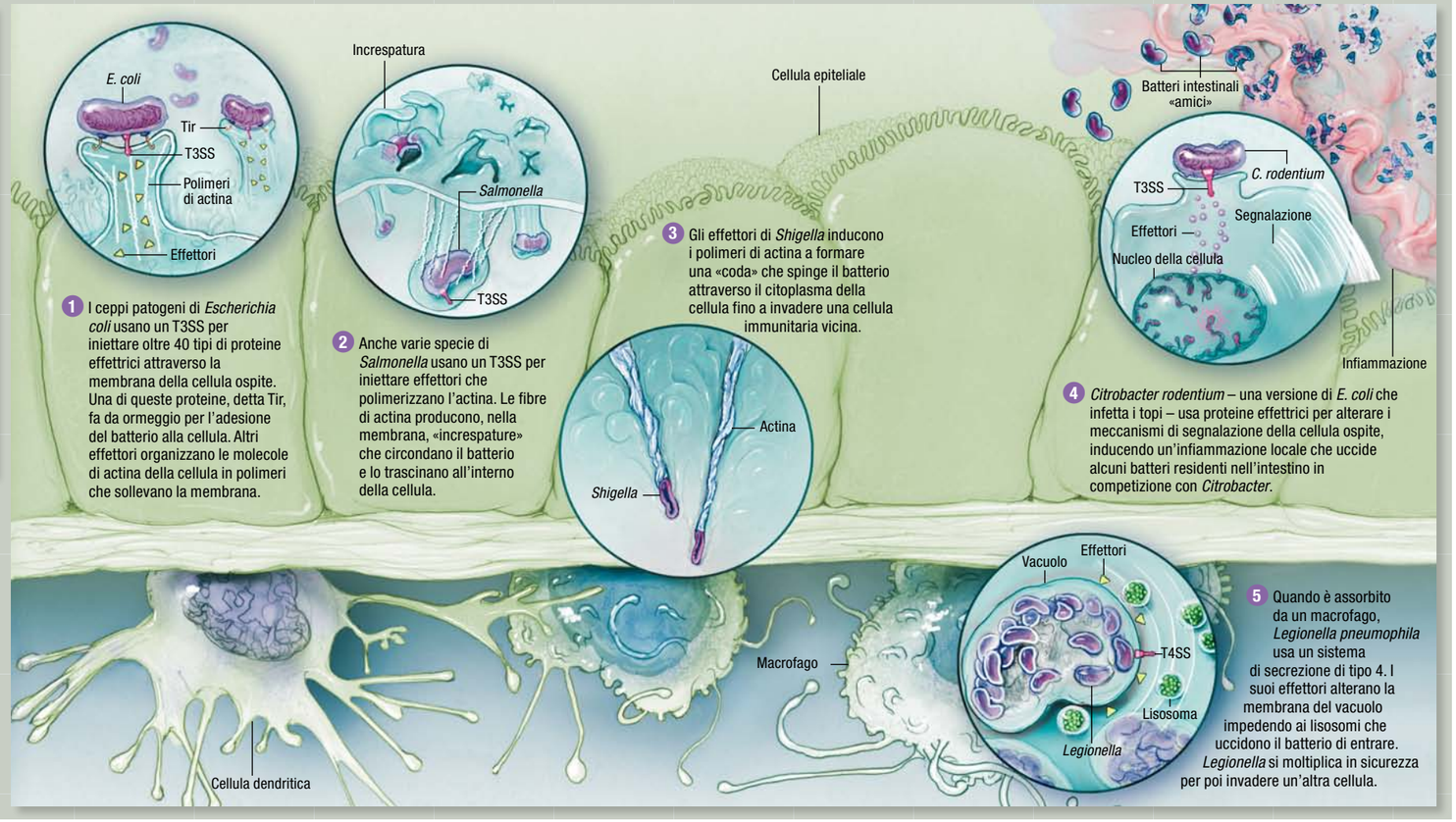
Come i batteri ingannano le cellule

I batteri che causano malattie promuovono la propria sopravvivenza arruolando meccanismi e sistemi di comunicazione delle cellule ospiti e alterando l'ambiente interno ed esterno alle cellule in base alle proprie necessità. Negli esempi qui sotto, batteri che invadono l'intestino sfruttano strutture specializzate (*riquadro a sinistra*) per manipolare alcuni tipi cellulari, fra cui cellule epiteliali, cellule immunitarie e batteri innocui.



SISTEMI DI SECREZIONE

Alcune strutture specializzate consentono ai batteri di iniettare direttamente nelle cellule ospiti molecole «effettrici» con cui assumere il controllo della cellula. Il sistema di secrezione di tipo 3 (T3SS) illustrato sopra è tipico. L'apparato secretorio principale, che si trova nella membrana batterica, si serve di un ago con cui introduce nella cellula ospite prima un traslocone di natura proteica, che serve ad ancorare lo stesso ago, poi le proteine effettrici.



1 I ceppi patogeni di *Escherichia coli* usano un T3SS per iniettare oltre 40 tipi di proteine effettrici attraverso la membrana della cellula ospite. Una di queste proteine, detta Tir, fa da ormeggio per l'adesione del batterio alla cellula. Altri effettori organizzano le molecole di actina della cellula in polimeri che sollevano la membrana.

2 Anche varie specie di *Salmonella* usano un T3SS per iniettare effettori che polimerizzano l'actina. Le fibre di actina producono, nella membrana, «increspature» che circondano il batterio e lo trascinano all'interno della cellula.

3 Gli effettori di *Shigella* inducono i polimeri di actina a formare una «coda» che spinge il batterio attraverso il citoplasma della cellula fino a invadere una cellula immunitaria vicina.

4 *Citrobacter rodentium* – una versione di *E. coli* che infetta i topi – usa proteine effettrici per alterare i meccanismi di segnalazione della cellula ospite, inducendo un'infiammazione locale che uccide alcuni batteri residenti nell'intestino in competizione con *Citrobacter*.

5 Quando è assorbito da un macrofago, *Legionella pneumophila* usa un sistema di secrezione di tipo 4. I suoi effettori alterano la membrana del vacuolo impedendo ai lisosomi che uccidono il batterio di entrare. *Legionella* si moltiplica in sicurezza per poi invadere un'altra cellula.

Jessica Weisman (*sagoma corpo umano, a fronte*)

Andrew Swift (*illustrazioni batteri e cellule*)

cuni adottano tattiche con cui si sbarazzano dei batteri benigni o benefici monopolizzando l'ambiente a proprio vantaggio. L'identificazione delle strategie e degli strumenti usati dai patogeni per invadere gli ospiti, aggirando le contromisure, ha permesso agli scienziati di sviluppare subito terapie con cui puntare contro questi microrganismi le loro stesse armi.

Effrazione e violazione di domicilio

Le tossine batteriche sono solo una delle cause delle malattie provocate dai batteri. Alcuni sintomi delle infezioni nascono dalle strategie adottate da questi microrganismi per rimanere in vita. Dato che patogeni diversi producono quadri sintomatici molto simili – febbre, diarrea e così via – sembra logico che siano simili anche i processi che causano le malattie. In effetti molti patogeni agiscono sugli stessi elementi fondamentali del macchinario cellulare, come specifiche proteine che costituiscono lo scheletro interno della cellula, il citoscheletro. Nei loro attacchi però i microbi usano una serie di metodi complessi e sorprendentemente diversi.

Per esempio, il primo passo di ogni attacco è l'adesione alle cellule dell'ospite. Forse il metodo più notevole di tutti per agganciarsi alla parete di una cellula ospite è quello usato del ceppo patogeno di *Escherichia coli* denominato *E. coli* enteroemorragico O157. Normalmente ingeriamo questo patogeno con cibo contaminato. Una volta giunto nel tratto gastrointestinale, O157 aderisce alla parete intestinale e produce una tossina che provoca diarrea sanguinolenta. Gli scienziati pensavano che questa forma virulenta di *E. coli*, come ogni altro patogeno aderente alla parete, si attaccasse a un recettore già presente sulla superficie delle cellule intestinali. Studi più recenti hanno però mostrato che O157 fabbrica un proprio recettore e lo trasferisce alla cellula con un cosiddetto «sistema di secrezione di tipo III» o, più in breve, T3SS. (I sistemi di secrezione sono stati numerati seguendo l'ordine in cui sono stati scoperti.)

Il T3SS inietta una molecola denominata Tir e oltre 40 proteine «effettrici», o effettori, nella membrana della cellula ospite, poi attacca una delle sue molecole di superficie a Tir. Questo però è solo il primo passo verso il controllo della cellula. Tir e alcuni degli effettori inducono il citoscheletro della cellula a comportarsi in modo anormale. Uno dei principali componenti del citoscheletro, l'actina, interagisce con le proteine batteriche producendo polimeri che esercitano una spinta sulla membrana cellulare fino a quando non si forma un piedistallo. *E. coli* rimane all'esterno della cellula, ancorato al suo nuovo trono, mentre gli effettori e le tossine che ha iniettato fanno il lavoro sporco. L'esatta funzione di questi piedistalli è ancora ignota, ma i ricercatori hanno dimostrato che sono essenziali per la patogenicità del batterio.

Un altro patogeno potenzialmente letale, *Helicobacter pylori*, si attacca alle cellule epiteliali che rivestono lo stomaco, e poi modifica l'ambiente per favorire la propria sopravvivenza. *H. pylori* rilascia l'enzima ureasi per contrastare localmente l'alta acidità dello stomaco, che normalmente uccide la maggior parte dei batteri. Non tutti i ceppi sono patogeni, ma quelli che lo sono possono causare ulcere gastriche e tumori allo stomaco, facendo di *H. pylori* l'unico caso noto di batterio che provoca il cancro. I ceppi patogeni producono un sistema di secrezione di tipo 4 che inietta una proteina effettrice detta CagA. Il ruolo di questa proteina non è chiaro, ma studi recenti suggeriscono che possa indurre le cellule epiteliali dello stomaco a mostrare un maggior numero di recettori a cui si attacca *H. pylori*. L'effettore può anche alterare direttamente la segnalazione interna delle cellule, inducendole ad allungarsi, disperdersi e infine morire, contribuendo alla formazione di ulcere.

I batteri *E. coli* O157 e *H. pylori* non hanno bisogno di entrare nelle cellule per provocare malattie, come invece fanno alcune specie di *Salmonella* strettamente imparentate con *E. coli*, che causano diarree che ogni anno colpiscono oltre un miliardo di persone in tutto il mondo. Per prosperare, i batteri del genere *Salmonella* devono entrare e attraversare le cellule epiteliali che rivestono l'intestino. L'invasione comincia quando il batterio usa una variante del T3SS chiamata isola di patogenicità 1 di *Salmonella* (SPI-1) per iniettare nelle cellule epiteliali effettori che polimerizzano l'actina, producendo nella membrana cellulare «increspature» analoghe ai piedistalli di *E. coli*. Le strutture dell'increspatura circondano il batterio attaccato all'esterno della membrana cellulare, e poi trascinano letteralmente il batterio all'interno della cellula. Inoltre le molecole iniettate con la SPI-1 causano la diarrea caratteristica di queste infezioni, ma i batteri del genere *Salmonella* non si fermano qui.

Normalmente i macrofagi e altre cellule del sistema immunitario innato, come neutrofili e cellule dendritiche, ingeriscono e distruggono (fagocitano) ogni invasore. Questi fagociti inghiottono i batteri e li sequestrano in vacuoli, delimitati da una membrana, dove alcune molecole uccidono e distruggono i prigionieri. *Salmonella* invece attraver-

IL MICROBIOTA UMANO

COMPOSIZIONE DEL CORPO UMANO

10.000 MILIARDI
di cellule umane

100.000 MILIARDI
di cellule batteriche

SPECIE BATTERICHE CHE VIVONO NEL CORPO UMANO

5000-35.000
nell'intestino

300-500
nella bocca

120
sulla pelle

SPECIE BATTERICHE PATOGENE PER GLI ESSERI UMANI

100

PERCENTUALE DEGLI ESSERI UMANI COLONIZZATI (CON O SENZA MALATTIA) DA ALCUNI COMUNI PATOGENI

33 per cento
Mycobacterium tuberculosis

50 per cento
Helicobacter pylori

50 per cento
Staphylococcus aureus

I sistemi di secrezione non si sono evoluti per far ammalare gli esseri umani, ma per proteggere i batteri dagli attacchi di altri organismi unicellulari che vivono nel suolo

sa il rivestimento intestinale proprio passando dalle cellule epiteliali alle cellule immunitarie in attesa sull'altro lato. Una volta dentro il vacuolo, il batterio attiva un secondo T3SS, detto SP2-2, che rilascia proteine effettrici. Queste proteine rendono il vacuolo un rifugio sicuro, dove *Salmonella* può moltiplicarsi, alterando proprio la membrana del vacuolo in modo da impedire il passaggio alle molecole che lo ucciderebbero.

Il sistema SPI-2 è fondamentale per il successo di *Salmonella typhi*, il ceppo che provoca la febbre tifoide. Questo sistema permette ai microrganismi di sopravvivere all'interno delle cellule fagocitarie che viaggiano nel corpo grazie al flusso sanguigno e al sistema linfatico. Quindi SPI-2 consente a *S. typhi* di raggiungere e replicarsi in tessuti molto lontani dall'intestino, come il fegato e la milza.

La capacità di vivere a lungo nelle cellule di un ospite è un tratto comune a molti batteri che provocano malattie gravi, fra cui i responsabili della tubercolosi e della malattia del legionario. In effetti, *Legionella pneumophila* è particolarmente interessante perché grazie al suo T4SS inietta nei fagociti almeno 80 effettori diversi. Alcuni di questi effettori convertono il vacuolo in un rifugio sicuro, ma solo di pochi conosciamo la funzione.

Il comportamento di *Legionella* apre una finestra sulle probabili origini dei meccanismi di secrezione dei batteri, che non si sarebbero evoluti per farci ammalare, ma per proteggere i microbi dagli organismi unicellulari del suolo. Di norma *Legionella* usa il T4SS per sopravvivere all'ingestione delle amebe del suolo, che per certi aspetti sono molto simili ai fagociti umani. Ed è proprio dall'associazione con le amebe che deriva il nome del batterio. Nel 1976 i condotti dell'aria condizionata di un albergo di Philadelphia, dove si teneva un convegno dell'American Legion, avevano aspirato amebe con *Legionella*. Queste amebe erano poi entrate in profondità nei polmoni dei partecipanti al convegno. I macrofagi degli alveoli polmonari avevano ingerito i batteri, proprio come avrebbe fatto un'ameba. La risultante malattia respiratoria uccise 34 persone: era nato il morbo del legionario.

Eludere le sentinelle

La capacità dei batteri di insediarsi nelle cellule immunitarie – proprio quelle che dovrebbero ucciderli – testimonia la versatilità degli strumenti usati da questi microrganismi per impadronirsi dei meccanismi cellulari. La somiglianza tra cellule immunitarie e predatori che vivono fuori dal nostro corpo potrebbe spiegare anche l'origine di altre tattiche di sopravvivenza adottate dai batteri. Alcuni dei più raffinati meccanismi conosciuti aggirano le difese dell'ospite e addirittura arruolano le cellule immunitarie, facendole contribuire alla prosperità dei batteri stessi.

Yersinia pestis, per esempio, è trasmesso dai ratti agli esseri umani attraverso le punture di pulci che iniettano il batterio nel sangue. Quando i fagociti cercano di uccidere il patogeno, il sistema T3SS di *Yersinia* inietta in queste cellule del sistema immunitario una serie di almeno quattro effettori. Come risultato si ha la paralisi del meccanismo della fagocitosi prima che la cellula immunitaria riesca a inghiottire la preda. I fagociti, con i batteri *Yersinia* attaccati alla superficie, entrano nei linfonodi, dove i microbi si moltiplicano provocando i dolorosi rigonfiamenti, o bubboni, da cui deriva il nome della peste bubbonica.

Nel corso dell'evoluzione molti patogeni hanno sviluppato sistemi di secrezione e iniezione capaci di riprogrammare selettivamente i sistemi di segnalazione e le risposte immunitarie delle cellule. *Shigella dysenteriae*, che causa la dissenteria, è un esempio dell'ampia gamma di tattiche impiegate da una singola specie nel processo infettivo. Dal punto di vista genetico *Shigella* è estremamente simile ai ceppi innocui di *E. coli*. Tuttavia *Shigella* è dotato di un T3SS che inietta nelle cellule dell'ospite tra 25 e 30 effettori. Queste proteine inducono le cellule a far entrare i batteri, in modo molto simile a *Salmonella*. Una volta entrato, *Shigella* recluta il macchinario citoscheletrico per attraversare la cellula e poi penetrare in una cellula vicina, evitando ogni incontro con le cellule immunitarie e le molecole anticorpali eventualmente in agguato all'esterno.

Ancora non abbiamo capito fino in fondo gli altri meccanismi usati da *Shigella* per sfuggire al sistema immunitario e riprogrammare i sistemi di segnalazione. Sappiamo però che numerosi effettori di *Shigella* interagiscono direttamente con i sistemi di segnalazione intracellulari, neutralizzando alcune richieste di aiuto normalmente emesse dalle cellule infettate. Ma non tutti i segnali delle cellule ospiti vengono silenziati. Il batterio si serve di un certo livello di segnalazione per attirare le cellule dendritiche verso il sito dell'infezione. È in queste cellule, infatti, che poi penetra, sfruttandole come cavallo di Troia per attraversare la parete intestinale. Questo passaggio provoca la grave diarrea caratteristica della dissenteria.

I batteri non ingannano solo il sistema immunitario innato. Alcuni hanno imparato a evitare la risposta immunitaria «acquisita», attuata da cellule B produttrici di anticorpi e cellule T, tutte addestrate dalle cellule immunitarie innate a riconoscere uno specifico agente patogeno grazie alle caratteristiche della sua superficie (antigeni). I batteri possono sfuggire a queste difese, cambiando costantemente le proprie proteine di superficie, e quindi non essere riconosciuti dagli anticorpi o secernendo enzimi che degradano gli anticorpi.

Shigella fa parte di un gruppo di patogeni che bloccano la produzione degli anticorpi, impedendo ai fagociti di mostrare gli antigeni alle cellule del sistema immunitario acquisito. *Salmonella* può anche scatenare una cascata di segnali intracellulari che induce i fagociti a suicidarsi prima di interagire con le cellule del sistema immunitario acquisito.

Una comunità competitiva

Per prosperare i patogeni devono fare qualcosa in più rispetto a manipolare i meccanismi di segnalazione cellulare e ingannare le difese immunitarie. Devono vincere la competizione dei tantissimi batteri normali e amici del corpo, protagonisti ignorati, fino a tempi recenti, dalla maggior parte dei microbiologi e degli immunologi. Le superfici del corpo esposte all'ambiente esterno, comprese le mucose di rivestimento del tratto gastrointestinale, ospitano un'enorme popolazione di questi batteri. Per esempio ogni grammo del contenuto dell'intestino crasso contiene circa 60 miliardi di batteri: circa dieci volte la popolazione umana della Terra.

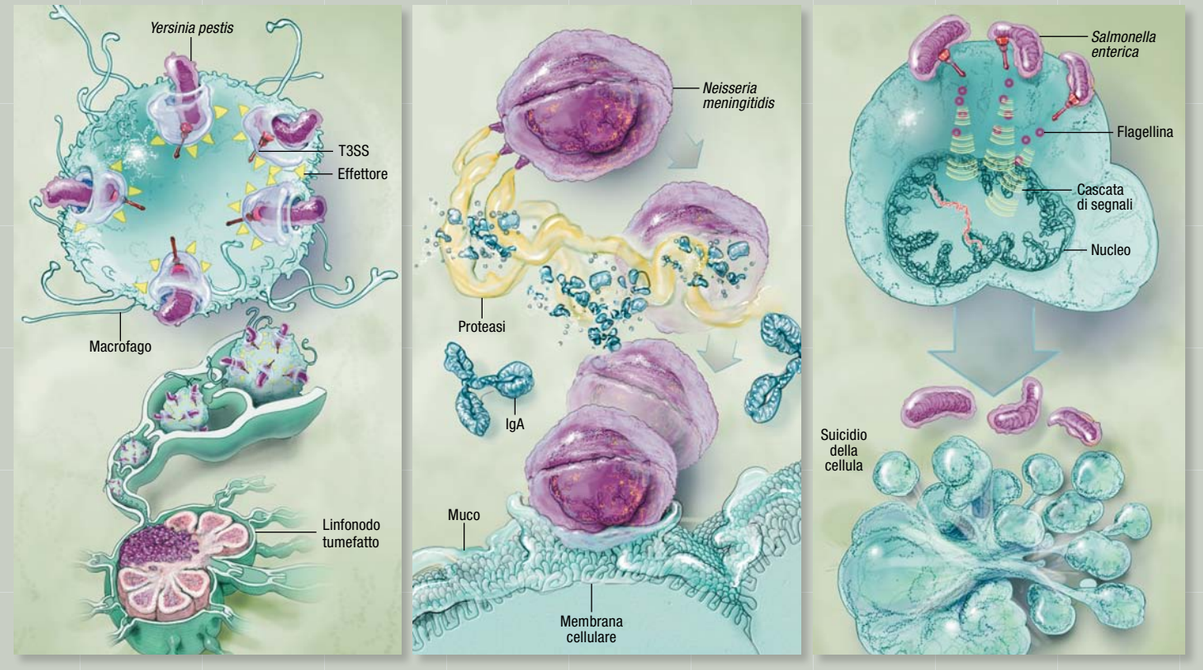
Uno dei modi più ovvi per eliminare la competizione è provocare la diarrea, e quindi liberarsi dei concorrenti espellendoli dal corpo, almeno temporaneamente. Insieme ai miei colleghi ho mostrato che una versione di *E. coli* patogena per i topi, denominata *Citrobacter rodentium*, scatena inten-

L'AUTORE

B. BRETT FINLAY è Peter Wall Distinguished Professor ai Michael Smith Laboratories, al Dipartimento di biochimica e biologia molecolare e al Dipartimento di microbiologia e immunologia dell'Università della British Columbia, in Canada. La sua attività di ricerca riguarda le interazioni tra patogeni e ospite a livello molecolare, ed è autore di numerose scoperte fondamentali. Finlay ha ottenuto numerosi riconoscimenti, è fra fondatori della Inimex Pharmaceuticals e dirige la SARS Accelerated Vaccine Initiative.

Eludere i guardiani

Le cellule immunitarie e gli anticorpi da esse prodotti dovrebbero neutralizzare gli invasori, ma i batteri patogeni riescono a eludere queste difese con varie tattiche e strumenti, come negli esempi riportati qui sotto.



SABOTARE I MACCHINARI

Quando un macrofago cerca di inghiottire *Yersinia pestis*, il batterio usa il suo T3SS per iniettare effettori che paralizzano i macchinari cellulari deputati all'assorbimento di corpi estranei. Il batterio si fa poi trasportare dalla cellula fino ai linfonodi, dove si moltiplica causando la tumefazione degli stessi linfonodi, e formando i tipici bubboni della peste.

DISTRUZIONE DEGLI ANTIBIOTICI

Le immunoglobuline A (IgA) sono anticorpi che bloccano i batteri impedendone l'adesione alle cellule epiteliali che tappezzano le vie nasali e altre analoghe superfici mucose del corpo. Ma *Neisseria meningitidis*, che provoca la meningite, riesce a colonizzare queste cellule rilasciando preventivamente una proteasi (un enzima) che degrada gli anticorpi.

INNESCARE L'AUTODISTRUZIONE

Alcune cellule dell'ospite, come i macrofagi, istruiscono altre cellule immunitarie a riconoscere i patogeni, ma *Salmonella enterica* riesce a impedire questa attività. Il batterio usa il suo T3SS per iniettare la proteina flagellina nella cellula. La flagellina innesca una cascata di segnali intracellulari che alla fine mette in moto un meccanismo di suicidio cellulare.

Cortesia B. Brett Finlay

Andrew Swift

Molti patogeni si sono evoluti da batteri innocui acquisendo geni che conferiscono nuove proprietà

zionalmente un'infiammazione intestinale, provocando l'arrivo di cellule del sistema immunitario innato che uccidono ed eliminano un particolare sottoinsieme del normale microbiota dell'intestino dell'animale. Liberi dai concorrenti che competono per le stesse risorse, i patogeni si moltiplicano rapidamente. Il dominio di questi batteri dura fino a quando non si attiva il sistema immunitario acquisito. A quel punto le cellule del sistema immunitario eliminano i patogeni, e la normale flora intestinale torna a popolare l'intestino.

In modo analogo, una versione murina di *Salmonella* adatta il suo comportamento alla composizione del microbiota dell'ospite. In genere, nei topi il batterio provoca una malattia sistemica simile al tifo. Ma se il microbiota dell'animale è stato precedentemente alterato con alte dosi di antibiotici, il patogeno produce una malattia limitata al tratto gastroenterico. Sembra che la competizione con i normali microrganismi dell'intestino spinga *Salmonella* a invadere tutto il corpo causando una malattia sistemica, ma se la flora batterica residente è stata alterata allora *Salmonella* resta nell'intestino.

Le interazioni fra microbi, sia patogeni che benigni, che avvengono all'interno di un'ospite permettono ai patogeni di ottenere e scambiare nuove armi. Molti patogeni, in effetti, si sono evoluti da microrganismi innocui acquisendo geni che conferiscono nuove proprietà. In questo senso, l'intestino può essere considerato una grande Internet genetica dei microbi, in cui ci si può scambiare geni che codificano per «fattori di virulenza», ovvero per trucchi e strumenti, come i sistemi di secrezione o le proteine effettrici, che incrementano la virulenza dei batteri.

L'acquisizione di nuove isole di patogenicità può favorire un microbo, consentendogli di colonizzare un nuovo ospite o di diventare più aggressivo. Per esempio si ipotizza che il letale *E. coli* O157 sia apparso per la prima volta alla fine degli anni settanta, quando una variante relativamente benigna di *E. coli* acquisì un'isola di patogenicità che codificava per un nuovo T3SS e il gene per la fabbricazione della tossina Shiga. Queste due proprietà insieme producono diarrea grave e malattia renale nell'infezione da O157.

VACCINI VITALI.
I bovini possono essere portatori di *E. coli* O157:H7 senza ammalarsi, ma questo batterio può causare disfunzioni renali fatali negli esseri umani. Econiche, un vaccino per questo patogeno destinato ai bovini, ha già ottenuto l'autorizzazione delle autorità sanitarie in Canada ed è in attesa di autorizzazione negli Stati Uniti. Il vaccino protegge gli esseri umani tenendo il batterio fuori dai prodotti alimentari.

Costruire nuove armi

La scoperta dei sistemi di iniezione e degli altri strumenti grazie a cui i patogeni sopravvivono e prosperano suggerisce nuove idee per superare le terapie con antibiotici, che danneggiano direttamente i batteri. Per esempio il mio gruppo di ricerca ha preso spunto dalla conoscenza dei sistemi di secrezione per escogitare un nuovo vaccino contro *E. coli* O157.

Il vaccino contiene frammenti del T3SS e diversi effettori, in modo che il sistema immunitario acquisito possa immediatamente imparare a riconoscere e neutralizzare queste proteine, impedendo al batterio di usarle. Questo vaccino protegge gli esseri umani da lontano, perché serve per i bovini. *E. coli* O157 prospera in modo innocuo in circa la metà dei bovini domestici. Ma le feci dei bovini possono diffondere il batterio negli alimenti e nelle fonti idriche, ecco perché nella maggior parte dei casi questo patogeno provoca la malattia attraverso l'ingestione di carne o altri cibi contaminati. Eliminando O157 alla fonte, il vaccino – attualmente in uso in Canada e in via di approvazione negli Stati Uniti – impedisce a O157 di raggiungere gli esseri umani.

Molti scienziati stanno esplorando altre strategie per sconfiggere i patogeni. Per esempio si potrebbero sviluppare terapie con cui spegnere i geni che codificano per i fattori di virulenza. Un approccio simile a quello appena descritto prevede la sintesi di farmaci che blocchino le molecole usate dal batterio per aderire a una cellula. In questo modo si impedisce al batterio di insediarsi nell'ospite. Un'anti-adesina pensata per *E. coli* patogeno ha già superato i *trial* di efficacia negli esseri umani, e ci sono altri farmaci del genere in stadi di sviluppo meno avanzati.

Un'altra strategia interessante riguarda la possibilità di interferire con le comunicazioni che avvengono tra i microrganismi. Batteri come *E. coli* valutano la propria posizione nell'apparato digerente «ascoltando» i segnali chimici emessi dal microbiota e dalle cellule dell'ospite. E queste informazioni hanno un ruolo nella «decisione» dei batteri di attaccare. Un altro patogeno, *Pseudomonas aeruginosa*, forma nei polmoni colonie chiamate biofilm. Ricercatori dell'Università di Copenhagen hanno mostrato che alcuni costituenti dei biofilm emettono segnali per avvertire gli altri batteri dell'avvicinarsi delle cellule immunitarie, inducendoli a secernere un peptide che uccide queste cellule.

Uno dei vantaggi del puntare ai fattori che ci fanno ammalare è che in genere queste molecole non sono essenziali per la sopravvivenza del batterio fuori dal corpo umano. A differenza dei tradizionali antibiotici, che tentano di uccidere direttamente i patogeni, i trattamenti più recenti bloccano le comunicazioni e altri meccanismi virulenti, rendendo innocui i batteri ma lasciandoli vivi. Così la resistenza ai farmaci dovrebbe emergere più lentamente, se non scomparire del tutto.

Lance Iversen, «San Francisco Chronicle»/Corbis

Attaccare le armi dei batteri

Grazie a una migliore conoscenza degli strumenti usati dai batteri per ingannare le cellule e le loro difese, gli scienziati stanno sviluppando una serie di approcci per contrastare l'attacco di questi microrganismi. Alcuni degli esempi riportati qui sotto sono già ai primi stadi di sperimentazione sull'uomo (fase 1 o fase 2) ma la maggior parte sono ancora nello stadio preclinico (di laboratorio).

BERSAGLIO	SOSTANZA (MODALITÀ DI AZIONE)	FASE DI SPERIMENTAZIONE
Adesione alle cellule umane	**Immunoglobulina** (blocca il funzionamento delle proteine di adesione batteriche)	Fase 2*
	Glicodendrimeri (agiscono da falso bersaglio per le proteine di adesione batteriche)	Preclinica
	Pilicides («Pilicidi») (impediscono la fabbricazione delle proteine di adesione)	Preclinica
Sistemi di secrezione di tipo 3	**Salicilidene-acilidrazidi** (bloccano l'assemblaggio dei sistemi di secrezione)	Preclinica
Geni della virulenza	**Virstatin (Virstatina)** (blocca la fabbricazione di tossine e di molecole di adesione)	Preclinica
	Peptidi inibitori autoinducenti (bloccano la fabbricazione di molecole di segnalazione)	Preclinica
Comunicazioni	**Azitromicina** (interferisce con diversi aspetti delle comunicazioni batteriche)	Preclinica*
Cellule immunitarie dell'ospite	**IMX942** (modifica la segnalazione e l'infiammazione)	Fase 1 (Canada)
	Butirrato di sodio (induce la produzione di peptidi antimicrobici)	Fase 2

*Già approvato per altri usi dalla Food and Drug Administration

Metodi ancora più indiretti per sovvertire le strategie dei patogeni cercano di rendere ostile l'ambiente in cui vivono questi batteri. Diversi ricercatori stanno studiando come alterare il microbiota in modo da farlo competere con i patogeni. È noto il principio di ingerire probiotici (batteri innocui come *Lactobacillus*) e prebiotici (zuccheri utili a incrementare la crescita dei batteri benefici) per proteggersi dalle malattie. E in effetti molte persone usano cibi come lo yogurt per cercare di aumentare la popolazione di commensali. Queste strategie però non sono state ancora testate con sufficiente rigore da determinare quali batteri offrano i benefici più grandi, e non sono stati identificati batteri abbastanza potenti da combattere un'infezione già in atto.

Lo studio delle strategie con cui aumentare la risposta delle cellule immunitarie è un po' più avanti. Molte sostanze immunostimolanti sono già usate in piccole dosi come additivi per i vaccini, senza effetti collaterali. E diverse aziende biotecnologiche sono impegnate nei primi stadi di ricerca o nelle prove cliniche preliminari riguardanti nuove sostanze progettate per aumentare o migliorare le risposte immunitarie naturali.

Forse l'ostacolo principale nello sviluppo di farmaci del genere riguarda la separazione degli aspetti benefici dell'infiammazione – il cui ruolo è reclutare le cellule immunitarie necessarie per affrontare l'invasore – da livelli dannosi di infiammazione che possono danneggiare l'ospite. I dati ottenuti fanno pensare che l'ostacolo possa essere superato. Un esempio arriva da un farmaco basato su ricerche condotte dal mio gruppo e da Robert Hancock, dell'Università della British Columbia, su peptidi di difesa dell'ospite, cioè piccole proteine prodotte dalle cellule immunitarie innate in risposta ai patogeni. Alcuni di questi peptidi attraversano le membrane dei batteri per ucciderli; altri fungono da molecole-segnale per chiamare altre cellule immunitarie a rinforzo. Uno dei peptidi che abbiamo scoperto, denominato IDR-1, fa parte del secondo gruppo: induce le cellule dendritiche a emettere segnali con cui richiamare i macrofagi per combattere i batteri, ma impedisce ai macrofagi di emettere altri tipi di segnale – sostanze come il fattore di necrosi tumorale alfa – che possono scatenare un'infiammazione incontrollata. In test sugli animali, IDR-1 ha ridotto l'infiammazione e allo stesso tempo ha aumentato la risposta delle cellule immunitarie al sito dell'infezione.

Non ci sono regole che vietino di rivolgere contro il nemico le sue stesse armi. E se i batteri possono imparare a manipolare i segnali delle cellule immunitarie, di certo possiamo farlo anche noi. Negli ultimi vent'anni la nostra conoscenza dei meccanismi alla base della virulenza batterica è cresciuta esponenzialmente, rendendo sempre più chiara la raffinatezza delle strategie usate dai batteri. I patogeni si sono evoluti insieme ai loro ospiti, adattando in modo sempre più sottile e preciso gli strumenti a disposizione.

I batteri hanno molti assi nella manica, ma anche noi. Lo studio dei metodi ingegnosi sfruttati dai batteri per invadere e ingannare i loro ospiti ha migliorato anche la nostra conoscenza del sistema immunitario e dei processi patologici. Grazie a questa conoscenza sempre più profonda delle interazioni tra ospite, patogeni e microbiota gli scienziati stanno progettando nuovi metodi con cui prevenire e curare le infezioni batteriche, alternative di cui abbiamo urgente bisogno. ■

➥ Letture

An Anti-infective Peptide That selectively Modulates the Innate Immune Response. Scott M.G. e altri in «Nature Biotechnology», Vol. 25, n. 4, pp. 465-472, 25 marzo 2007.

Manipulation of Host-Cell Pathways by Bacterial Pathogens. Bhavsar A.P., Guttman J.A. e Finlay B.B., in «Nature», Vol. 449, pp. 827-834, 18 ottobre, 2007.

Molecular Mechanisms of *Escherichia coli* Pathogenicity. Croxen M.A. e Finlay B.B., in «Nature Reviews Microbiology», pubblicato on line, 7 dicembre 2009.

La seconda vita delle balene

Sul fondo degli oceani, i cadaveri dei grandi cetacei sono la fonte di sopravvivenza di ecosistemi unici

di Crispin T.S. Little

IN SINTESI

- Il cadavere di una sola balena può nutrire un ecosistema specializzato per decenni.
- Alcuni indizi suggeriscono che gli ecosistemi di questo genere siano collegati ad altre comunità tipiche dei fondali, come quelle che sorgono presso le sorgenti idrotermali.
- È possibile che milioni di anni fa specie simili a quelle trovate presso i cadaveri dei cetacei vivessero sfruttando i cadaveri dei rettili marini.

Nel 1987 un team di oceanografi guidati da Craig Smith effettuò una serie di immersioni per mappare i fondali sterili e poveri di nutrienti del bacino di Santa Catalina, al largo della California meridionale. Durante l'ultima di queste immersioni il sonar del loro sottomarino Alvin rilevò la presenza di un grosso oggetto. Inabissatisi fino a 1240 metri di profondità, gli scienziati scoprirono uno scheletro di balena lungo 20 metri, parzialmente sepolto da sedimenti. Riguardando le registrazioni video, l'equipaggio concordò che lo scheletro era appartenuto probabilmente a una balenottera azzurra o a una balenottera comune. L'animale era morto da anni, ma le sue ossa e l'acqua intorno a esse brulicavano di vita: vermi, piccoli bivalvi, lumache, patelle e chiazze bianche di colonie microbiche. Quel cadavere era un'oasi rigogliosa in mezzo a un vasto deserto senza vita.

Quasi un anno più tardi Smith, che è oceanografo dell'Università delle Hawaii a Manoa, tornò sul luogo per effettuare uno studio dettagliato dello scheletro. Il suo lavoro ha permesso di identificare diverse specie prima sconosciute alla scienza e di individuarne altre che erano state osservate solo in ambienti particolari, come le sorgenti idrotermali sottomarine.

Da allora i ricercatori hanno documentato la presenza di decine di comunità marine alimentate dalle carcasse affondate dei cetacei morti, descrivendo più di 400 specie che vivono dentro o intorno a quei resti, 30 delle quali mai osservate altrove. È così iniziato lo studio del funzionamento di queste sorprendenti comunità «balena-dipendenti» e del modo in cui si sono evolute.

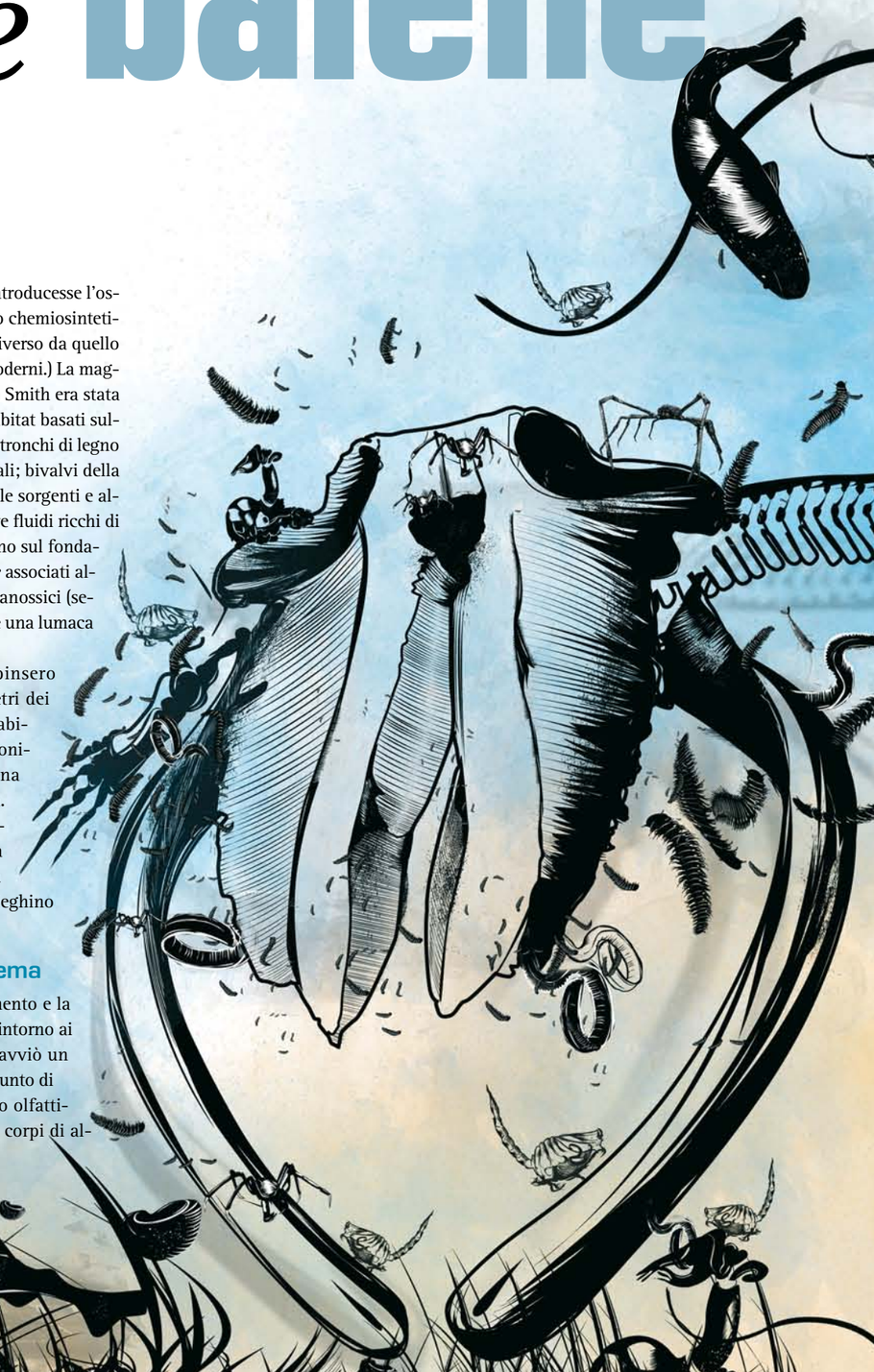
I primi sospetti che i cadaveri dei cetacei potessero ospitare comunità animali specializzate risalgono addirittura al 1854, quando uno zoologo descrisse una nuova specie di piccoli mitili estratti da «tane» scavate in un pezzo di grasso di balena che galleggiava al largo del Capo di Buona Speranza. Nel XX secolo, con la diffusione su scala commerciale della pesca a strascico, i ricercatori scoprirono che simili casi di dipendenza dai cadaveri dei cetacei non erano insoliti. Dagli anni sessanta in poi, in Scozia, Irlanda, Islanda e soprattutto presso le isole Chatham, a est della Nuova Zelanda, fu recuperato un numero sempre più alto di crani e altre ossa di cetacei a cui erano attaccati esemplari di molluschi mai visti prima. Un osso recuperato nel 1964 da una rete a strascico al largo della costa sudafricana era ricoperto dagli stessi piccoli mitili descritti nel 1854 più o meno nella stessa area.

I mitili non sono gli unici animali trovati tra le ossa di balena: nel 1985 fu descritta una minuscola specie di patella (le patelle sono molluschi simili alle lumache di mare, ma con la conchiglia conica anziché a spirale), seguita da altre. Le patelle furono battezzate *Osteopelta* per via della loro associazione con le ossa. Ma fu solo nel 1987, con la scoperta di Smith, che l'importanza e la diffusione di questi ecosistemi divennero chiare. Le specie di molluschi trovate dal suo team erano particolarmente interessanti perché appartengono a gruppi noti per ospitare batteri chemiosintetici. Questi batteri possono ricavare energia dalle sostanze inorganiche e, in certi casi, costituire la base di interi ecosistemi. (Gli organismi arcaici, prima che la vita «inventasse» la fotosintesi e introducesse l'ossigeno nella biosfera, erano di tipo chemiosintetico; il loro metabolismo era però diverso da quello degli organismi chemiosintetici moderni.) La maggior parte dei molluschi trovati da Smith era stata osservata in precedenza solo in habitat basati sulla chemiosintesi: mitili associati ai tronchi di legno sommersi e alle sorgenti idrotermali; bivalvi della famiglia *Vesicomyidae* associati alle sorgenti e alle emissioni fredde (*cold seep*), dove fluidi ricchi di metano e di altri idrocarburi filtrano sul fondale; bivalvi della famiglia *Lucinidae* associati alle emissioni fredde e ai sedimenti anossici (sedimenti marini privi di ossigeno); e una lumaca associata ai sedimenti anossici.

Nel 1989 queste analogie spinsero Smith a ipotizzare che gli scheletri dei cetacei morti possano agire da habitat transitori che gli animali bentonici sfruttano per diffondersi da una comunità chemiosintetica all'altra. Rimane ancora da chiarire se queste creature riescano a spostarsi tra le varie comunità nell'arco di una sola generazione o se invece impieghino più tempo.

Come nasce un ecosistema

Per capire meglio il funzionamento e la longevità delle comunità presenti intorno ai resti dei cetacei, nel 1992 Smith avviò un progetto piuttosto complesso dal punto di vista logistico – e anche da quello olfattivo. Insieme al suo team prelevò i corpi di al-



Doug Alves

cune balene spiaggiate sulle coste della California e li trainò in mare aperto, dove li lasciò affondare dopo avere fissato ai cadaveri zavorre di acciaio pesanti fino a 2700 chilogrammi per contrastare la spinta idrostatica dei gas prodotti dalla decomposizione. (La maggior parte dei cetacei, quando muore, ha un galleggiamento negativo, per cui affonda anziché spiaggiarsi.) Poi visitò le carcasse a intervalli regolari usando l'Alvin o altri veicoli teleguidati. Nell'arco di sei anni, furono affondate tre balene grigie nell'arco di sei anni, che vennero visitate periodicamente fino al 2000. Inoltre i ricercatori tornarono allo scheletro trovato nel 1987 e a un altro scoperto nel 1995.

Queste osservazioni hanno permesso di stabilire che i cadaveri dei grandi cetacei attraversano tre fasi ecologiche distinte, in parte sovrapposte. La prima, detta fase dei saprofagi, inizia quando il cadavere arriva sul fondo. Qui, orde di missinoidi scavano nella carne, mentre alcuni squali della famiglia *Somniosidae* strappano brandelli più consistenti. Questi animali rimuovono gran parte dei tessuti molli del cetaceo (grasso, muscoli e organi interni), consumando dai 40 ai 60 chilogrammi di carne al giorno. Nonostante questi ritmi, però, il banchetto può durare anche due anni, a seconda delle dimensioni del cadavere.

Anche la seconda fase, detta degli opportunisti, può durare due anni, durante i quali comunità molto numerose ma con bassa biodiversità colonizzano i sedimenti intorno alla carcassa e le ossa spogliate dai muscoli, cibandosi delle grosse quantità di grasso e altri tessuti molli lasciate dagli spazzini. In questa fase dominano i policheti e i crostacei.

Infine, quando tutti i tessuti molli sono stati rimossi, il cadavere entra nella terza fase, la più lunga, detta dei solfofili. In questa fase alcuni batteri specializzati decompongono anaerobicamente i lipidi contenuti nelle ossa. Al contrario dei batteri aerobi, che userebbero l'ossigeno molecolare (O_2) disciolto nell'acqua di mare per digerire i nutrienti, questi microrganismi sfruttano i solfati (SO_4) come fonte di ossigeno e producono acido solfidrico (H_2S) come sostanza di scarto. Gli animali non sono in grado di usare questo gas, che in genere è tossico, direttamente come fonte di energia. Alcuni batteri chemiosintetici, però, possono farlo. Sfruttano l'O_2 presente nell'acqua per ossidare l'acido solfidrico, generando l'energia necessaria per crescere. Gli animali possono quindi sfruttare questi batteri in maniera simbiotica (come fanno i mitili, i vesicomyidi e i lucinidi) o mangiare le colonie che formano (come fanno le patelle e le lumache). Per ragioni ancora non chiare, le ossa dei cetacei sono estremamente ricche di lipidi (la carcassa di una balena di 40 tonnellate può contenerne tra i 2000 e i 3000 chilogrammi) e la loro decomposizione è molto lenta. Di conseguenza, se l'esemplare è particolarmente grande la fase solfofila può durare più di cinquant'anni, forse anche un secolo.

In base a questi dati, e a una stima di circa 69.000 grandi cetacei morti all'anno, Smith ha ipotizzato che, in ogni momento, nei mari del pianeta potrebbero trovarsi 690.000 scheletri in decomposizione appartenenti alle nove specie più grandi di cetacei. (Naturalmente, prima che la caccia intensiva degli ultimi due secoli ne riducesse drasticamente il numero è probabile che i cadaveri fossero molti di più, forse persino sei volte il numero attuale.) La distanza media tra un cadavere e l'altro sarebbe allora di soli 12 chilometri; lungo le rotte migratorie delle balene grigie potrebbe addirittura essere di soli 5 chilometri. Queste distanze ridotte consentirebbero alle larve di disperdersi da un sito all'altro, confermando l'idea di Smith che questi organismi chemiosintetici si spostino sfruttando i cadaveri dei cetacei, le sorgenti idrotermali e le emissioni fredde.

Creature dell'oscurità

Dopo che Smith e colleghi hanno lanciato l'idea di affondare i cadaveri di balena, altri gruppi in Svezia, in Giappone e a Monterey (in California) ne hanno seguito l'esempio. Altri scheletri sono stati trovati per caso in diversi punti dei fondali oceanici, per esempio presso Torishima, nel sud del Giappone, e nella baia di Monterey. I nuovi studi hanno confermato che un considerevole gruppo di organismi dipende per la propria sopravvivenza dai cadaveri dei cetacei. Le tre fasi osservate a Santa Catalina, però, non sono così evidenti altrove.

Una spiegazione di questa discrepanza potrebbe

Sui fondali del pianeta, in ogni momento, potrebbero esserci fino a 690.000 carcasse appartenenti alle nove più grandi specie di cetacei

L'AUTORE

CRISPIN T.S. LITTLE è professore di paleontologia all'Università di Leeds. Negli ultimi 14 anni si è occupato della storia macroevolutiva delle comunità animali attive intorno alle sorgenti idrotermali, alle emissioni di idrocarburi e ai resti dei grandi cetacei.

Cortesia Crispin T.S. Little (*Little*); Jen Christiansen (*balena*); Catherine Wilson (*specie negli inserti*)

Un banchetto lungo cinquant'anni

Ogni carcassa di balena che precipita sul fondo dell'oceano porta un'improvvisa abbondanza di risorse in ambienti bui e deserti. Gli ecosistemi formati dagli organismi che si cibano della carcassa attraversano tre fasi ecologiche distinte. Ogni fase è caratterizzata dalla presenza di determinate specie, ma è frequente una certa sovrapposizione.

FASE DEI SAPROFAGI

I missinoidi, antichi parenti dei vertebrati che sono praticamente ciechi e vivono sui fondali fangosi, mangiano la maggior parte del grasso e dei muscoli, aiutati da altri animali spazzini come squali e granchi.

DURATA: FINO A 2 ANNI

FASE DEGLI OPPORTUNISTI

Gli animali si cibano del grasso e della carne rimasti e dell'olio di balena che impregna i sedimenti circostanti. In questa seconda ondata di spazzini troviamo gasteropodi, anellidi policheti e crostacei. Nel frattempo i «vermi zombie» (*si veda la foto a p. 99*) iniziano ad affondare le proprie radici nelle ossa per assorbirne i lipidi.

DURATA: FINO A 2 ANNI

FASE DEI SOLFOFILI

I batteri anaerobi producono acido solfidrico, che altri batteri, detti «solfofili», possono usare come fonte di energia. I batteri solfofili sostengono a loro volta tutti gli altri organismi (*inserto in basso*). Mitili, vermi tubicoli e altri molluschi bivalvi traggono energia da questi batteri, con cui hanno una relazione simbiotica. Gli anellidi policheti e le patelle, invece, si nutrono direttamente delle loro colonie. I crostacei, infine, predano gli animali presenti.

DURATA: FINO A 50 ANNI

MICROBI VITALI

I batteri anaerobi presenti nelle ossa (*area verde*) estraggono l'ossigeno dai solfati (SO_4) disciolti nell'acqua (*1*) e lo usano per digerire i lipidi contenuti nelle ossa. Come sostanza di scarto liberano acido solfidrico (H_2S) (*2*), che i batteri solfofili (*in arancione*) ossidano per ricavare energia usando l'ossigeno presente nell'acqua (*3*).

Una comunità tutta italiana

di Stefano Dominici
e Silvia Danise

La dinamica interna della Terra, i movimenti della crosta, il lento incedere del tempo geologico concorrono a realizzare un fenomeno che è stato oggetto di scrutinio da parte degli antichi filosofi: la presenza di antichi fondali marini disseccati e delle ricchezze da loro custodite nel tempo. A molti di noi le schiere di conchiglie che a volte riemergono dopo la pioggia sui campi coltivati di Piemonte, Emilia o Toscana sfuggono facilmente. Ma quando ad affiorare sono le ossa del cetaceo che un tempo inghiottì Pinocchio le cose cambiano. Quando accanto alle conchiglie si stagliano le grosse costole e le vertebre sbiancate di una balena, allora la notizia arriva sui giornali, e tutti ne discutono, affollando la mente con immagini di tirannosauri, felci arboree, libellule gigantesche.
Così è successo dopo il ritrovamento in un campo arato nei pressi di Orciano Pisano, nell'entroterra di Livorno, di alcune vertebre di grosse dimensioni e colore rossastro. Lo scheletro scavato nel 2007, tuttavia, racconta una storia di particolare interesse. È una storia che ci ricongiunge alla scoperta fatta nei moderni fondali oceanici dai biologi marini del sommergibile Alvin, poco più di vent'anni fa. Una storia di balene affondate e banchetti pantagruelici.
Il ritrovamento ha fornito l'opportunità di condurre uno scavo allo scopo di recuperare uno scheletro fossile e quante più informazioni possibile sulla comunità fossile a esso associata, ovvero la successione ecologica caratteristica delle comunità che vivono presso le carcasse di balena. Il risultato ha fornito indicazioni su una successione ecologica analoga a quelle di mare profondo, con alcune differenze documentate in un recente articolo apparso su «Geology».
La balena di Orciano giace sul ventre, ed è ben articolata, ma le ossa non sono in buono stato di conservazione. Lo strato superficiale (corticale) è spesso mancante, e quello spugnoso sottostante è molto fragile, con un colore diverso da quello originale per la presenza di ossidi di ferro. Le vertebre toraciche mancano completamente, probabilmente a causa della completa dissoluzione in loco. Il cranio, articolato alle vertebre cervicali, è pure profondamente consumato, rendendo difficile il riconoscimento tassonomico del cetaceo. Le mandibole giacciono una a fianco del cranio, l'altra ruotata di 90 gradi. Le ossa degli arti sono alterate superficialmente, mentre sono ben conservate le poche falangi ritrovate (i cetacei hanno un numero di falangi più elevato degli altri mammiferi).

Sotto uno degli arti è emerso un grosso dente di squalo bianco (*Carcharodon carcharias*), e le ossa del timpano presentano incisioni prodotte da denti simili a quello ritrovato. Altri denti appartenenti allo squalo azzurro (*Prionace glauca*) sono stati trovati nelle vicinanze. Tra i carnivori, tre grossi esemplari di crostacei decapodi. I molluschi sono ovunque abbondanti e con molte specie: grossi predatori, piccoli e numerosi necrofagi tra i gasteropodi, filtratori e depositivori tra i bivalvi. Tra questi ultimi troviamo la specie più significativa ai fini della comprensione della successione ecologica, il lucinide *Megaxinus incrassatus*, abbondante nella zona del torace e del cranio, con le valve articolate e in posizione di vita. I lucinidi sono organismi chemiosimbiotici, che ospitano nei filamenti delle branchie colonie di batteri solfofili, e per questo sono abbondanti in ambienti ricchi di materia organica e riducenti, sia in acque basse (per esempio presso le praterie di posidonia) sia in profondità. Tramite correnti create all'interno delle cavità dove si trovano le branchie, *Megaxinus* pompa acido solfidrico dal fondale e con esso nutre la flora batterica, mantenendo quel liquido separato dall'acqua ricca di ossigeno usato per la respirazione.
Che cosa è successo su quel fondale marino riemerso dopo 3 milioni di anni? La moderna distribuzione batimetrica di molte specie ritrovate ci rivela che la profondità di sedimentazione era compresa tra 50 e 150 metri, quindi a profondità a cui non è ancora noto come si strutturi una comunità presso una carcassa di balena.

GLI AUTORI

STEFANO DOMINICI è conservatore della Sezione geologia e paleontologia al Museo di storia naturale dell'Università di Firenze. SILVIA DANISE è dottoranda al Dipartimento di scienze della Terra dell'Università di Firenze.

Cortesia Stefano Dominici e Silvia Danise (3)

SCHELETRO DEL CETACEO recuperato nel 2007, con particolari della fauna chemiosimbiotica associata. La fauna ha un'età di circa 3 milioni d'anni (Pliocene), quando gran parte della Toscana era occupata dal mare. Lo studio di questa fauna è stato pubblicato da «Geology» nel 2009.

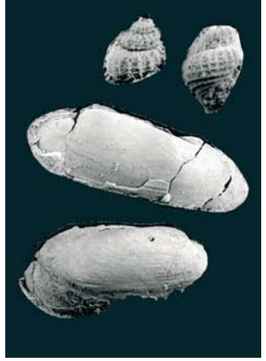
L'abbondanza di tracce e resti lasciati dagli squali rivela che pesci lunghi anche 4 metri hanno dato l'avvio al banchetto, consumando le carni prima della loro decomposizione.
Perché diciamo «prima»? Perché grossi predatori che strappano carne da un animale anche solo parzialmente decomposto non lascerebbero uno scheletro ben articolato come quello di Orciano (la decomposizione indebolisce le giunture articolari). Perché lo squalo bianco preferisce comunque attaccare prede vive, e non è annoverato tra gli spazzini. I grandi pesci cartilaginei hanno quindi dato inizio alla fase degli spazzini, ma non sono stati i soli attori. Lo stato delle ossa può essere inteso come indice dell'opera estensiva di *Osedax*, come prova il confronto con gli analoghi attuali.
In questa ricostruzione i vermi mangia-ossa avrebbero eroso il cranio fino a cancellarne ogni asperità e le vertebre toraciche fino a farle scomparire, indebolendo ovunque la struttura dei tessuti spugnosi. Ipotesi alternative come l'abrasione di origine meccanica sono da escludere, nuovamente a ragione dell'alto grado di articolazione dei resti. Quindi all'azione dei necrofagi si è affiancata, e ha fatto seguito, quella degli opportunisti, tra i quali possiamo contare i depositivori. Possiamo aggiungere che l'azione è stata più intensa nelle zone del torace e del cranio, probabilmente a causa della maggiore quantità di materia organica presente. In queste stesse zone si è passati allo stadio di produzione di acido solfidrico e a un ambiente riducente favorevole alla proliferazione di *Megaxinus* e dei suoi chemiosimbionti, il terzo stadio di una tipica comunità di questo genere, anche se priva delle forme specializzate incontrate negli ambienti profondi.
Rimane solo un'ipotesi la presenza dell'ultimo stadio di «scogliera», avendo trovato solo filtratori mobili, non necessariamente legati alla presenza di ossa sul fondo. L'insieme dei fossili studiati a Orciano Pisano costituisce la prima documentazione che la successione ecologica di una comunità che vive presso una carcassa di balena in acque basse presenta analogie e differenze con quelle di acque profonde. Il patrimonio fossile in genere, e quello italiano in particolare, sono un'importante fonte di informazioni sull'ecologia di organismi difficilmente raggiungibili in ambienti moderni, fornendo alla conoscenza una dimensione temporale profonda a sostegno delle teorie evolutive e delle tappe attraverso le quali si è diversificata la vita nel nostro pianeta.

BALENE: RICERCATE VIVE O… MORTE

Lo spiaggiamento di grossi cetacei è un fenomeno che in modo periodico e imprevedibile chiama a interventi di emergenza alcuni Comuni della fascia costiera italiana. La soluzione adottata di solito è l'interramento, che comporta il reperimento di discariche idonee, una logistica complessa e grossi costi. Poco considerata è invece la possibilità di trainare al largo le carcasse e affondarle in modo artificiale, una soluzione meno costosa e più naturale per l'ecosistema. Inoltre, se la carcassa affondata fosse localizzabile e accessibile si creerebbe un'opportunità unica di studiare la successione ecologica a essa associata. Le comunità che si insediano su una *whale fall* sono infatti ben studiate in molti oceani del globo, ma a oggi praticamente sconosciute in Mediterraneo. Il 2010, anno dedicato alla biodiversità, meriterebbe una simile iniziativa sperimentale. Per maggiori informazioni contattare: Stefano Dominici del Museo di storia naturale, Università di Firenze, Maria Cristina Gambi della Stazione zoologica «Anton Dohrn» di Napoli, Antonio Pusceddu del Dipartimento di scienze del mare, Università Politecnica delle Marche: sito Internet: www.medwhalefall.org.

PARENTI FOSSILI

Vari fossili di balena recano tracce che dimostrano che alimentarono comunità simili a quelle delle carcasse delle balene moderne, tra cui molti invertebrati che dipendono da batteri simbiotici sulfido-ossidanti. Un esemplare ritrovato all'interno di rocce del medio Miocene (circa 12 milioni di anni fa) sull'isola di Hokkaido, in Giappone, era circondato da conchiglie di molluschi, tra cui lumache del genere *Provanna* (le conchiglie a spirale in basso, 1 centimetro circa) valve di vesicomyide (*Adulomya chitanii*, 4 centimetri) e di mitile (*Adipicola*, 2 centimetri). Questi fossili hanno contribuito a una migliore comprensione delle odierne comunità che vivono delle carcasse di balena.



Da *A new Miocene whale-fall community from Japan*, di Kazutaka Amano, Crispin T.S. Little e Kiyokazu Inoue, in «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», Vol. 247, n. 3-4, 30 aprile 2007 (*fossili*); cortesia MBARI (*carcassa*)

essere che i siti sperimentali scelti da Smith sono relativamente poveri di ossigeno, e quindi hanno tempi di decomposizione più brevi. Un'altra ragione potrebbe essere la presenza di vermi del genere *Osedax* (in latino, «divoratore di ossa»), chiamati anche vermi «zombie». Questi piccoli animali (lunghi al massimo un centimetro) sono stati trovati per la prima volta nel 2004 su un cadavere di balena nella baia di Monterey e successivamente in altri cadaveri in Svezia e in Giappone. Più tardi i ricercatori li individuarono anche nei resti di Santa Catalina (inizialmente non li avevano notati), ma in quantità inferiori.

Gli *Osedax* hanno piccole appendici che si estendono nella colonna d'acqua per consentire lo scambio di gas, ma possono ritrarsi all'interno di un canale mucoso in caso di disturbo. Quando questo avviene, l'animale appare come un ammasso di muco attaccato alla superficie dell'osso. Come alcuni parassiti intestinali, gli esemplari adulti di *Osedax* non hanno un tratto digerente (niente bocca, stomaco né ano). Per nutrirsi si servono di «radici» carnose verdi con cui scavano cunicoli nelle ossa. Dalle ossa, presumibilmente, ricavano lipidi o proteine (o entrambi) per i batteri simbiotici presenti nelle radici. (Anche la strategia riproduttiva di questi vermi è insolita. Tutti gli adulti sono femmine, ma ognuna porta nel corpo decine di minuscoli maschi che non oltrepassano mai lo stadio larvale e la cui unica funzione è produrre spermatozoi.)

Il genere *Osedax* è imparentato con i vermi tubicoli della specie *Riftia pachyptila* che vivono presso le sorgenti idrotermali e le emissioni fredde. Gli studi genetici indicano che il genere si è formato circa 40 milioni di anni fa, più o meno contemporaneamente ai vesicomyidi e ai grandi cetacei.

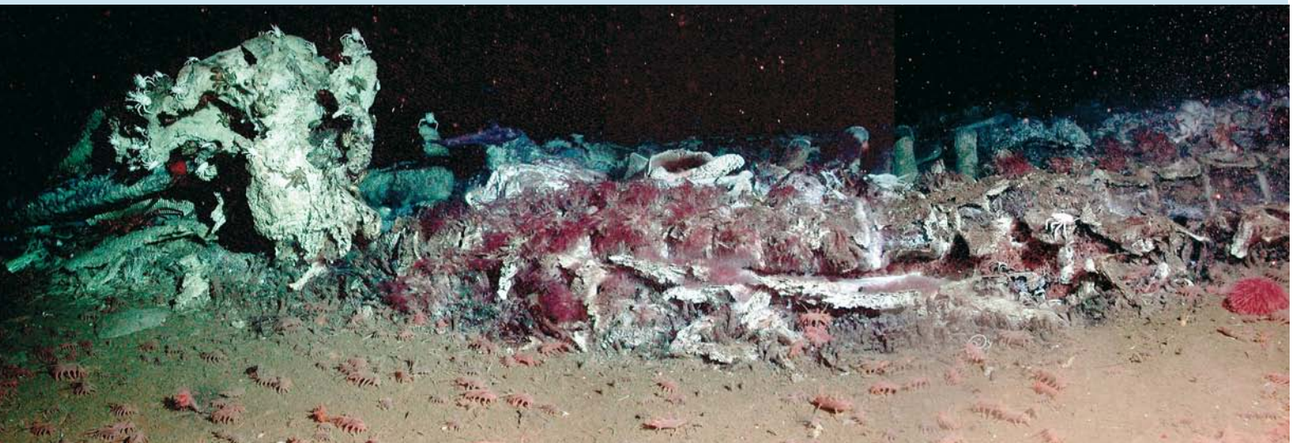
I cunicoli scavati dagli *Osedax* distruggono rapidamente le ossa, accelerando l'attività dei batteri solfofili, che a sua volta modifica l'intero habitat. Questo potrebbe spiegare perché molte carcasse rimangano attive per meno tempo di quanto si ipotizzasse inizialmente. Questa riduzione dei tempi, tra l'altro, complica l'ipotesi degli habitat di transizione di Smith: con una minore quantità di cadaveri attivi disponibili, infatti, gli spostamenti degli animali (o delle loro larve) da una comunità chemiosintetica all'altra sarebbero più difficili.

A caccia di ossa

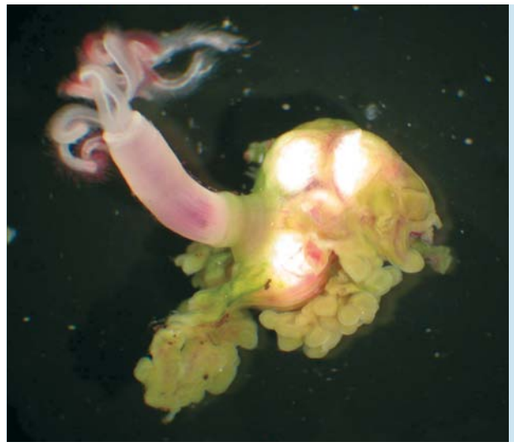
Mentre le sorgenti idrotermali e le emissioni fredde esistono da tempi remotissimi (le sorgenti in particolare potrebbero essere il luogo in cui ha avuto origine la vita), i cetacei sono apparsi in epoche relativamente recenti. Per capire quando e in che modo siano nati gli ecosistemi che dipendono dai loro cadaveri è necessario rivolgersi alla paleontologia.

Sebbene negli ultimi 150 anni siano stati trovati molti fossili di cetacei, i resti delle prime comunità sorte intorno a un loro cadavere furono trovati solo nel 1992, nello Stato di Washington, all'interno di rocce risalenti all'Oligocene (da 34 a 23 milioni di anni fa). Da quel momento l'interesse per queste bizzarre comunità è cresciuto, portando a nuove scoperte. Tra queste vi sono alcuni fossili del Miocene (da 23 a 5 milioni di anni fa) ritrovati in California e in tre siti giapponesi. Che tutte queste antiche comunità sorgessero intorno a cadaveri di cetacei lo si deduce dalla presenza al loro interno di molluschi che ospitano i batteri chemiosintetici o che si cibano delle loro colonie. Ovviamente in questi giacimenti fossili non ci sono animali privi di scheletro, come i vermi, perché le parti molli del loro corpo si degradano rapidamente. Non è quindi ancora possibile sapere se animali come gli *Osedax* vivessero in queste comunità.

AFFONDATA A 2891 METRI SOTTO IL LIVELLO DEL MARE nella baia di Monterey, in California, questa balena grigia, lunga 10 metri, forniva nutrimento a una popolosa comunità comprendente cetrioli di mare (*Scotoplanes globosa*, in primo piano) e vermi mangiaossa (*Osedax rubiplumus*, sulle ossa). I tre fotogrammi che compongono questa immagine sono stati scattati nel 2002; da allora, alcune delle ossa si sono decomposte completamente.



Cortesia MBARI



I VERMI *OSEDAX* (dal latino «divoratore di ossa»), anche detti vermi zombie, affondano speciali peduncoli nelle ossa dei cetacei morti, delle quali si nutrono. Questi organismi sembrano vivere esclusivamente in questi habitat. Questo *Osedax frankpressi* è stato rimosso da un osso per mostrarne i peduncoli (*in verde*) e le ovaie (*in bianco*); normalmente sarebbero visibili solo il corpo (*in rosa*), lungo solo un centimetro, e i pennacchi. Finora sono state scoperte almeno cinque specie diverse di *Osedax*.

Nel 2006, Steffen Kiel, all'epoca all'Università di Leeds, e Jim Goedert, del Burke Museum of Natural History and Culture di Seattle, notarono che le comunità più antiche, risalenti alla fine dell'Eocene e all'Oligocene, erano dominate da molluschi bivalvi che vivono anche negli habitat in cui non avviene la chemiosintesi; al contrario, i molluschi chemiosintetici che caratterizzano la fase solfofila delle moderne comunità comparvero per la prima volta solo nel Miocene. I ricercatori hanno perciò ipotizzato che i primi cetacei non fossero abbastanza grandi da ospitare comunità di batteri solfofili.

Di recente, tuttavia, sulle coste di un'isola californiana è stato trovato lo scheletro di un piccolo cetaceo risalente al Miocene al quale sono associati bivalvi vesicomyidi. La scoperta potrebbe indicare che per i molluschi chemiosintetici non erano determinanti le dimensioni del cetaceo, quanto piuttosto il contenuto relativo di lipidi nelle sue ossa: un valore che probabilmente è aumentato negli ultimi 20 milioni di anni, forse come misura per garantire la sopravvivenza quando questi mammiferi hanno iniziato a spostarsi sempre più verso il mare aperto.

In effetti, fin da quando sono state scoperte le prime comunità, i ricercatori hanno sospettato che simili habitat esistessero anche prima della comparsa dei cetacei, per esempio intorno alle carcasse di antichi rettili marini come i plesiosauri, gli ittiosauri e i mosasauri, che erano tra i principali predatori degli oceani del Mesozoico. (Il Mesozoico è l'era geologica che va da 251 milioni a 65 milioni di anni fa.) Questa idea ha ricevuto un'ulteriore conferma nel 1994, con la scoperta di un fossile di *Osteopelta* in un osso di tartaruga proveniente da sedimenti neozelandesi risalenti all'Eocene. Sebbene l'Eocene sia più recente del Mesozoico, la scoperta dimostrerebbe che le patelle che oggi si nutrono delle ossa dei cetacei erano in grado di sopravvivere con le ossa dei rettili, quindi forse anche con quelle dei rettili marini del Mesozoico.

Nel 2008, in Giappone, un gruppo di ricerca ha scoperto all'interno di rocce risalenti al Cretaceo superiore le ossa di due plesiosauri lunghi circa 10 metri a cui erano associate lumache della famiglia *Provannidae*. Finora i provannidi sono stati trovati solo in comunità chemiosintetiche, per cui è possibile che i cadaveri dei plesiosauri fossero in grado di sostenere ecosistemi simili alla fase solfofila dei cadaveri dei cetacei. Questi rettili si estinsero però 65 milioni di anni fa, insieme ai dinosauri, e visto che i grandi cetacei comparvero solo 20 milioni di anni più tardi, non è da escludere che l'evoluzione delle specie dipendenti dalle carcasse dei grandi vertebrati sia avvenuta in più riprese.

Il gruppo ha dimostrato in maniera convincente che l'interno delle ossa dei plesiosauri era molto simile alle ossa dei moderni cetacei, con un grande numero di cavità, contenenti probabilmente lipidi. L'effettivo contenuto di lipidi nelle ossa non sarà però facile da determinare. D'altra parte, sembra che molte delle specie presenti nelle comunità solfofile dei cadaveri di cetacei esistessero già nei pressi delle emissioni fredde, intorno a resti di origine vegetale e probabilmente anche vicino alle sorgenti idrotermali, e che da lì siano partite per sfruttare i nuovi habitat chemiosintetici creati dalla comparsa dei mammiferi marini.

I fossili di cetacei sono piuttosto scarsi, e i dati provengono quasi esclusivamente dal Giappone e dalla costa occidentale degli Stati Uniti. Il ritrovamento di fossili di *Osedax* potrebbe essere particolarmente utile, vista l'influenza che questa specie ha sulle moderne comunità, ma data la mancanza di uno scheletro è improbabile che verranno trovati. Tuttavia, i cunicoli scavati da questo verme potrebbero essere ancora visibili nelle ossa fossilizzate, e diversi gruppi di ricerca sono già al lavoro per trovarne.

Anche la distribuzione globale dei cadaveri di balena è poco nota. Finora sono state trovate solo poche carcasse e ci sono pochi dati sulle aree in cui le popolazioni di cetacei sono più numerose, come l'Antartide e l'Oceano Meridionale. Saranno necessarie altre scoperte per capire se la storia ecologica ed evolutiva degli ecosistemi che sorgono intorno ai resti dei cetacei abbia alcuna relazione con quella delle comunità che fiorivano intorno ai cadaveri degli antichi rettili, e per capire se questi due ecosistemi siano collegati in qualche modo alle altre comunità chemiosintetiche che abitano le profondità degli oceani. ■

➥ Letture

Espandere i limiti della vita. Bradley A.S., in «Le Scienze» n. 498, febbraio 2010.

Ecology of whale falls at the deep-sea floor. Smith C.R. e Baco A.R., in «Oceanography and Marine Biology: An Annual Review», Vol. 41, pp. 311-354, 2003.

I mammiferi che conquistarono i mari. Wong K., in «Le Scienze» n. 406, giugno 2002.

Immaginate di essere...

...un nuovo piccolo ospite della casa dei Rudi, un specie di insetticida biologico che offre lo spunto per un nuovo problema di geometria

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Immaginate di stare a 500 millimetri esatti dall'angolo diedro che separa parete e soffitto. Immaginate di vedere quella sottile linea d'ombra che non ha colore, eppure risalta più scura, come ben vedono le vostre pupille ellittiche. Immaginate di poter superare quella linea senza difficoltà alcuna, perché la gravità, che già non riesce a farvi scivolare lungo questa candida parete, nulla potrebbe neanche se decideste di affrontare il soffitto, ancora più bianco e con il vettore g *drammaticamente e perpendicolarmente opposto al vostro incedere.*

Immaginate di avere una massa di pochi grammi, e di saper resistere a forze di trazione di decine di newton, migliaia di volte superiori al vostro peso. Immaginate di avere cinque dita per arto, larghe, forti e soprattutto setose. Immaginate di avere, su quelle dita, fibre 100 volte più sottili dei capelli umani più fini, e di affidare a esse la vostra magica potenza. Immaginate di sapervi attaccare e staccare su superfici più lisce di un diamante, senza bisogno di colla, artifici chimici o mezzucci organici come la bava dei ragni. Immaginate di avere in quelle fibre forze possenti e molecolari, che gli umani chiamano arrogantemente col nome di uno di loro, Van der Waals, anziché chiamarle come dovrebbero, ovvero col nome della vostra specie.

Immaginate gli spaventosi campi d'energia che si intrecciano lungo le vostre setole, quasi 15.000 per ogni millimetro quadrato; immaginate di essere come io sono, più saldo delle fondamenta più profonde, grazie alla più misteriosa delle forze delle natura che io ho qui imprigionata nelle mie 20 dita. Immaginate, se potete. E dopo aver immaginato quest'universo di scienza, possanza e mistero sentite come osa chiamarmi quel gigantesco terricolo incollato al pavimento.

«Attenta al mio insetticida!».

«Capo, con l'attuale livello di PM10 che vige nelle nostre amate metropoli, non c'è insetticida che possa preoccuparci», Alice sorride a Rudy con un velo d'ironia che le smorza il naturale sorriso. «E ti ringrazio per il paragone. Immagino che tu volessi paragonarmi a una leggiadra farfalla, ma se riesci a sopravvivere in un ambiente come questo, non credo correremo dei rischi».

Rudy sogghigna, continuando a fissare la parete di fronte, in alto.

«Treccia, tu potresti forse essere davvero paragonata a una leggiadra farfalla, ma Doc, come lepidottero, sarebbe schifato pure dal più affamato dei rospi. Comunque non volevo proteggere voi, ma solo evitare che spaventaste il mio nuovo insetticida ecologico».

Lo avete sentito? Insetticida, mi chiama. Sono un universo di scienza applicata in pochi grammi di materia organica altamente evoluta, e lui mi chiama insetticida...

«Cosa stai cercando di... Ehi, hai visto? C'è una lucertola sul muro!».

«Appunto. Non è una lucertola, è un geco. Si chiama Leopoldo: è entrato ieri sera in camera dalla finestra aperta, e questa notte non ho sentito volare una zanzara».

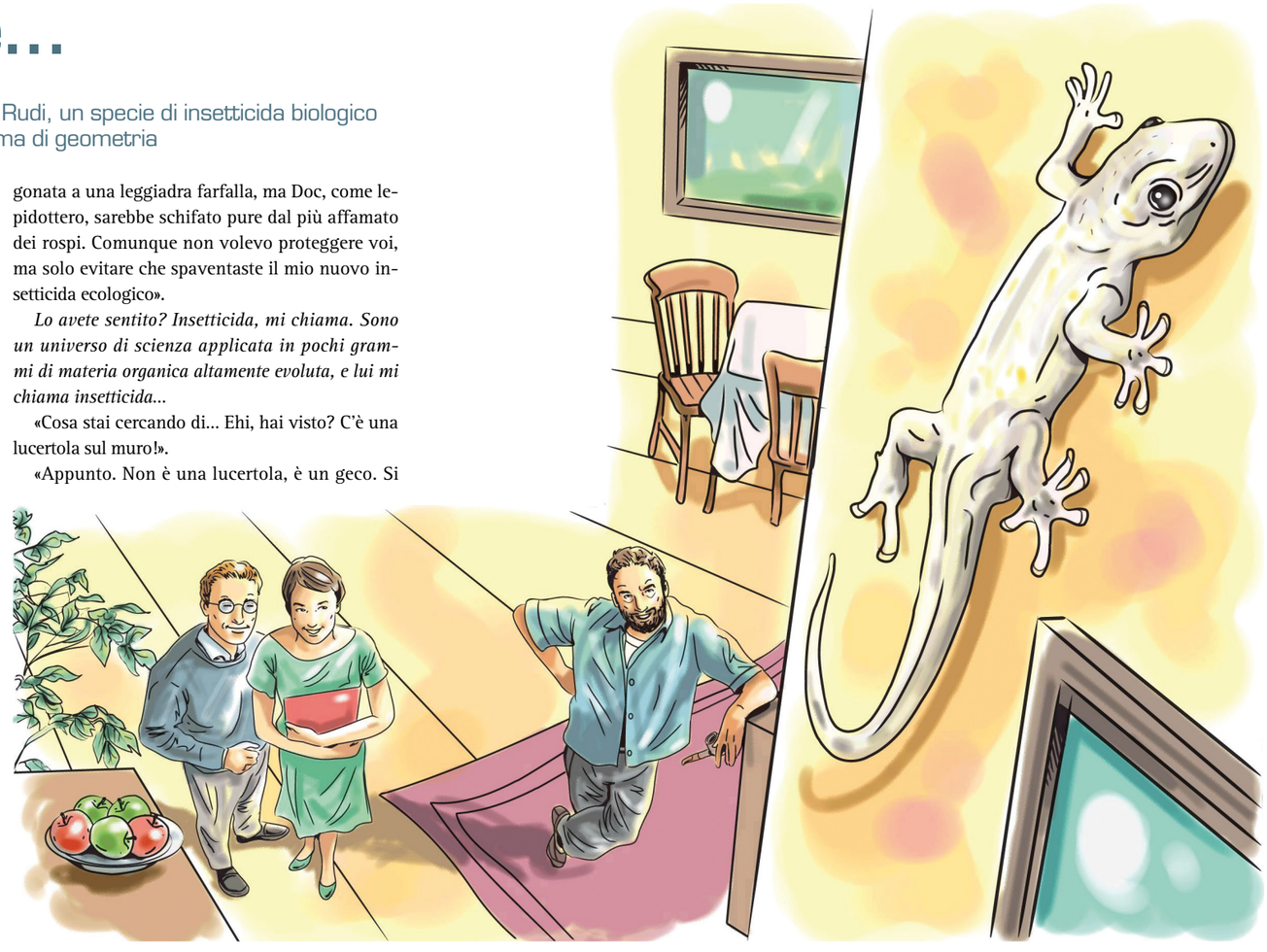


Illustrazione di Stefano Fabbri

Piotr si avvicina quanto può alla parete senza spaventare il geco che, forte delle sue capacità mimetiche, sembra sforzarsi di diventare il più bianco e trasparente possibile, per confondersi.

«Beh, fossi in te mi rallegrerei molto per l'assenza delle zanzare, ma comincerei a preoccuparmi per la presenza di Leopoldo», commenta infine. «I gechi sono comunissimi nei luoghi caldi, e ben lo sanno gli abitanti del nostro Sud. Ma vederlo piazzato in primavera su un muro a latitudini prealpine, beh... O c'è di mezzo una romanzesca combinazione logistica, o è un pessimo indizio sul livello del riscaldamento globale».

«Di certo ha l'aria simpatica – osserva Alice – con quel sorriso perennemente stampato in faccia. Perché dici che si chiama Leopoldo?».

«Come Kronecker, no? È il suo ritratto sputato, non vedi? Comunque guarda che non sta sorridendo: si sta preparando a cacciare quella mosca sul muro di fronte. È ferma lì da dieci minuti, sarà rimbambita dall'odore del tabacco. Scommetto che Leopoldo, fra un po', partirà all'attacco».

Tabacco, tzè. Questi umani non sanno ancora niente delle nostre straordinarie potenzialità di caccia. Sono davvero ingenui... Mi chiedo solo come abbia fatto a indovinare il mio nome...

«Rudy, mi stavo chiedendo...». Piotr appare pensieroso: «Conosci le dimensioni di questa stanza?».

«Vuoi farmi preoccupare? Sembra che tu voglia porre un quesito... Comunque la stanza è circa 5 × 7, con il soffitto di 4 metri. Dove vuoi arrivare?».

«Beh, Leopoldo è a mezzo metro dal soffitto, sulla verticale di mezzo della parete minore...».

«Cinquecento millimetri», corregge Rudy. E prima che Doc possa protestare, precisa: «Lo so che 500 millimetri è lo stesso di mezzo metro, e so anche meglio che non ha senso essere così precisi: ma per qualche ragione preferisco che tu dica cinquecento millimetri, okay? E sono sicuro che anche Leopoldo la pensa come me».

Questo posso concedertelo, umano con la pipa.

«Uh. Beh, la mosca che ha adocchiato è a... Va bene, a 500 millimetri dal pavimento, sulla verticale di mezzo della parete opposta. Immagino che tu sappia trovare la via più breve che Leo deve percorrere per raggiungere la mosca, immobile e paralizzata dal suo ammaliante sorriso».

Non è il sorriso, è... Ah, non capireste. E comunque «Leopoldo» va bene, «Leo» no. Chiaro?

«Certo che so trovarla, la via più breve. Ma è vero, in questo caso la geometria di una stanza è più intrigante di quella di un pianeta sferico. E mi viene in mente una certa complicazione...».

«Eh no, dai! Per una volta che il problema lo pongo io...».

Lascialo parlare, voglio sentire dove va a parare. L'argomento mi interessa.

«La mosca e il geco sono uno agli antipodi dell'altro, nella geometria della stanza; e noi, sulla Terra, siamo abituati a considerare gli antipodi come i punti più distanti, ma questo non vale per tutte le geometrie. Ebbene, sapreste trovare le posizioni geco-mosca per cui Leopoldo sia costretto a fare il massimo della strada, maggiore anche di quella che farebbe se fosse agli antipodi, pur seguendo la via più breve, per arrivare alla mosca?».

Tzè. Roba da asilo infantile dei gechi... Chissà che mi credevo, io. Sono molto più indietro di quel che credevo, questi umani...

Il problema di marzo: i contenitori di d'Alembert

Il mese scorso, Sherlock d'Alembert giocava con tre contenitori in cascata. Se immaginiamo il contenitore superiore diviso in *k* intervalli, ognuno di essi, svuotandosi, farà perdere al contenitore una quantità *1/k* di liquido.
Così, all'intervallo *i*–esimo, la quantità d'acqua presente nel contenitore intermedio sarà:

$$A_i = \frac{k-1}{k} A_{i-1}$$

Poiché $A_0 = 1$ (all'inizio il contenitore intermedio è pieno d'acqua), ogni A_k varrà:

$$A_k = \frac{k-1}{k} A_{k-1} = \frac{k-1}{k} \times \left(\frac{k-1}{k} A_{k-2}\right) = \left(\frac{k-1}{k}\right)^2 A_{k-2} = \ldots = \left(\frac{k-1}{k}\right)^k$$

facendo tendere *k* a infinito, si vede che la percentuale di acqua nel contenitore intermedio è pari a *1/e*.

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di maggio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.